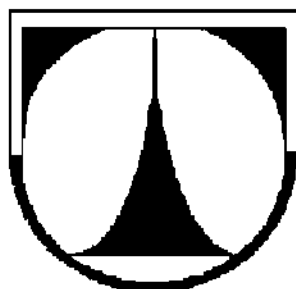


Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra energetických zařízení



Diplomová práce

**Numerická simulace nestacionárních toků oleje
v převodových skříních**

(Numerical simulation of unsteady oil flows in gear-boxes)

František Lemfeld

Liberec 2007



**TECHNICKÁ UNIVERZITA
V LIBERCI**

Fakulta strojní



Katedra energetických zařízení

Studijní program: magisterský – M2301 strojní inženýrství

Obor: 2302T010 Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření: Tepelná technika

František Lemfeld

**Numerická simulace nestacionárních toků oleje v převodových
skříních**

(Numerical simulation of unsteady flows in gear-boxes)

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Fraňa, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Doc. Ing. Jiří Unger, Csc.

Rozsah práce

Počet stran: 64

Počet obrázků: 112

Počet tabulek: 3

Počet grafů: 0

Počet příloh: 4

V Liberci 25. května 2007

TÉMA: Numerická simulace nestacionárních toků oleje
v převodových skříních

ANOTACE: (Stručný výtah náplně, způsob řešení výsledků)

Tato diplomová práce obsahuje studii nestacionárního proudění oleje v převodových skříních a ukazuje časový vývoj do ustáleného stavu proudění. Numerická simulace je řešena v komerčním softwaru Fluent, tvorba sítě v programu Gambit. Pro řešení jsou použity nejprve zjednodušené modely kola a soukolí, následně pak model celé převodové skříně. Je uvažován vliv provozních stavů a změny viskozity na charakter proudění oleje.

THEME: Numerical simulation of unsteady oil flows in gear-boxes

ANNOTATION: (Short summary of content, used methods)

This student work includes numerical study of unsteady oil flows in gear-boxes and shows time progres to the steady state flow. Numerical simulation is solved in the comercial software Fluent. Computational grid is generated in Gambit. On the first place simplyfied models of one gear and set of gears are considered, then sequentially model of whole gearbox. An influence of operation cases and viscosity changes to the character of flows is studied.

KLÍČOVÁ SLOVA: Převodová skřín, numerická simulace, provozní stavy,
vícefázové proudění

KEY WORDS: Gear-box, numerical simulation, operation cases, multiphase
flows

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřeby TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 25. května 2007

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my theses to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

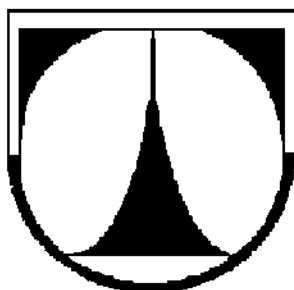
In Liberec 25th May 2007

Signature:

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Karlu Fraňovi, PhD., za podporu, motivaci, odborné vedení, cenné připomínky, čas a trpělivost a také panu Doc. Ing. Jiřímu Ungerovi, Csc. za podporu při řešení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Wikov MGI a.s. za poskytnutou možnost tvorby diplomové práce a také svým rodičům a přátelům za vytvoření optimálních podmínek.

Technická univerzita v Liberci



Fakulta strojní, Katedra energetických zařízení

Diplomová práce

**Numerická simulace nestacionárních toků
oleje v převodových skříních**

František Lemfeld

Obsah:

Obsah:.....	- 8 -
Seznam použitých zkratk a symbolů	- 10 -
1. Úvod:.....	- 11 -
2. Úvod do problematiky.....	- 13 -
2.1 Převodové skříně	- 13 -
2.2 Vznik tepla.....	- 13 -
2.3 Mazání	- 14 -
3. Postup řešení	- 15 -
3.1 Tvorba sítě	- 15 -
3.1.1 Tvorba základního modelu	- 15 -
3.1.2 Vysíťování modelu	- 16 -
3.2 Zjednodušující předpoklady	- 19 -
3.2.1 Modelování ozubení	- 19 -
3.2.2 Rozstřík oleje v případě soukolí ozubených kol.....	- 20 -
3.3 Šikmé ozubení	- 22 -
3.4 Naklání převodové skříně	- 24 -
3.5 Vliv viskozity	- 26 -
3.6 Nastavení programu Fluent	- 26 -
3.6.1 Použitý model turbulence	- 27 -
3.6.2 Vícefázový model	- 27 -
3.6.3 Celkový postup nastavení	- 29 -
4. Výsledky	- 33 -
4.1 Vysvětlení zobrazení	- 33 -
4.2 Klidový stav převodové skříně a počáteční stavy	- 34 -
4.2.1 Osamoceně kolo se šikmými zuby	- 35 -
4.2.2 Soukolí se šikmými zuby.....	- 36 -
4.3 Náklony převodové skříně – osamoceně kolo.....	- 37 -
4.3.1 Podélný náklon +11°	- 37 -
4.3.2 Podélný náklon -11°	- 38 -
4.3.3 Příčný náklon +6°	- 39 -
4.3.4 Příčný náklon -6°	- 40 -

4.3.5 Kombinovaný náklon $+11^{\circ}+6^{\circ}$	- 41 -
4.3.6 Kombinovaný náklon $-11^{\circ}-6^{\circ}$	- 42 -
4.3.7 Kombinovaný náklon $+11^{\circ}-6^{\circ}$	- 43 -
4.3.8 Kombinovaný náklon $-11^{\circ}+6^{\circ}$	- 44 -
4.4 Náklony převodové skříně – soukolí ozubených kol	- 45 -
4.4.1 Podélný náklon $+11^{\circ}$	- 45 -
4.4.2 Podélný náklon -11°	- 46 -
4.4.3 Příčný náklon $+6^{\circ}$	- 47 -
4.4.4 Příčný náklon -6°	- 48 -
4.4.5 Kombinovaný náklon $+11^{\circ}+6^{\circ}$	- 49 -
4.4.6 Kombinovaný náklon $-11^{\circ}-6^{\circ}$	- 50 -
4.4.7 Kombinovaný náklon $+11^{\circ}-6^{\circ}$	- 51 -
4.4.8 Kombinovaný náklon $-11^{\circ}+6^{\circ}$	- 52 -
4.5 Kompletní převodová skříně	- 53 -
4.5.1 3D model sítě a počáteční stav	- 53 -
4.5.2 Časový vývoj proudění	- 54 -
4.6 Vliv viskozity	- 57 -
5. Závěr	- 58 -
6. Seznam obrázků	- 60 -
7. Literatura:	- 64 -

Seznam použitých zkratk a symbolů

m	mm	modul
Z	-	počet zubů kola
b (kapitola 3.3.2)	mm	šířka ozubení
h	mm	výška zubu
D_f	mm	průměr patní kružnice
n	min^{-1}	otáčky kola
s_1	mm	šířka zubové mezery
V'	mm^3	objem nabraného oleje na zub
V_c	m^3/hod	celkový objemový tok nabraného oleje
v	m/s	obvodová rychlost
a	mm	šířka mezery mezi koly
O_1	-	osa rotace kola
O_2	-	osa rotace modelované drsnosti
β_1, β_2	°	úhly sklonu šikmého ozubení
A	-	počáteční bod osy rotace modelované drsnosti
B	-	koncový bod osy rotace modelované drsnosti
X, Y, Z	mm	prostorové souřadnice v kartézském systému souřadnic
y	-	hodnota úhlu β
g	m/s^2	gravitační zrychlení
g_x, g_y, g_z	m/s^2	prostorové složky zrychlení v kartézském systému souřadnic
k	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	turbulentní kinetická energie
ω		specifická rychlost disipace
η	Pa.s	dynamická viskozita
ρ	kg/m^3	hustota
p_a	kPa	atmosférický tlak
t	s	čas
α_q	-	označení q-té objemové složky v objemu
a'	mm	osová vzdálenost ozubených kol

1. Úvod:

V převodových skříních dochází obecně k transformaci daných vstupních parametrů (vstupní otáčky, vstupní krouticí moment) na žádané parametry výstupní (výstupní otáčky, výstupní krouticí moment). Nejčastěji dochází k přenosu kroutícího momentu pomocí tvarového styku, za použití ozubených kol.

Vlivem montáže, výrobních úchylek, průhybu hřídele a dalších parametrů však při provozu ozubeného převodu dochází vlivem tření ke vzniku tepla. Generované teplo s dobou provozu narůstá, což vede k ohřevu komponent v převodové skříní. Jelikož použité materiály ztrácí s vyšší teplotou svoje mechanické vlastnosti, je nutno teplo vznikající v místě záběru odvádět pomocí maziva - oleje. Dalším důležitým zdrojem tepla vznikajícího v převodových skříních jsou valivá ložiska hřídelů ozubených kol. Vlivem tření tělísek vzniká teplo, které přestupuje na převodovou skřín.

V technické praxi je nejrozšířenějším způsobem mazání převodových soukolí rozstřik oleje pomocí v olejové lázni se brodícího ozubeného kola. Hlavními funkcemi oleje jsou snížení tření v místě záběru a odvod tepla ze zahřívajících se kol. Další funkcí oleje je mazání a odvod tepla z ložisek, což může být ještě zintenzivněno pomocí sběrné kapsy umístěné v převodové skříní. Z tohoto důvodu je důležité, aby při daných provozních podmínkách nedocházelo díky nedokonalému rozstřiku oleje ke snížení těchto funkcí. Změna směru rozstřiku může také ovlivnit množství oleje přiváděného k ložiskům přes sběrnou kapsu. Nedokonalé mazání má za důsledek snížení životnosti ozubených kol. Nerovnoměrné rozložení teplot v převodové skříní, tímto způsobené, může mít vliv například na podstatně rozdílnou životnost použitých valivých ložisek.

Určení skutečného chování oleje v převodové skříní je složitým a komplexním problémem. Vystupuje zde celá řada parametrů, které výsledný děj ovlivňují. Jedná se především o konstrukční varianty skříní, vliv změny vlastností oleje s teplotou, opotřebení oleje, různé otáčky kol, naklánění hladiny oleje ve skříní apod. Z tohoto důvodu je řešení úlohy pomocí numerické simulace velice výhodné. Problém je vyřešen v relativně krátkém čase, simulace je v porovnání s experimentem nenáročná na přípravu a přináší kompletní přehled o nestacionárním chování oleje. Zajímavé může být též porovnání výsledků numerické simulace s experimentem.

Cílem této práce je určit chování dvoufázové směsi olej – vzduch v převodové skříně, přičemž hlavním úkolem je sledování hladiny olejové lázně při simulování provozních stavů a vliv změny viskozity na rozstřík oleje v převodové skříně. Provozními stavy je myšleno především zastavení, rozjezd, změna sklonu vozovky a změna směru jízdy dopravního prostředku, jehož je převodová skříň součástí. Postihnouti těchto parametrů probíhá prostřednictvím náklonu hladiny olejové lázně. Pro numerickou simulaci bylo použito komerčního programu Fluent, pro tvorbu modelů spolu s výpočetní sítí programu Gambit a Pro Engineer Wilfire 2.

Problematika byla nejprve simulována na zjednodušeném případě osamoceného ozubeného kola. Uvažováno je jak přímé, tak šikmé ozubení. Model osamoceného kola poskytuje stabilní řešení v uspokojivém čase, a tak umožňuje relativně snadnou změnu parametrů ovlivňujících chování oleje. Na tomto modelu jsou řešeny provozní stavy skříně a vliv změny viskozity s teplotou na charakter proudění.

Následně byla problematika rozšířena na soukolí ozubených kol, kde je možno sledovat vliv záběru kol na množství rozstříknutého oleje. Opět je uvažováno přímé i šikmé soukolí. Jedná se o model složitější, čemuž odpovídá doba výpočtu. Realizovány byly simulace provozních stavů.

V závěrečné fázi zahrnuje studie model celé převodové skříně, který rozměrově odpovídá vyráběné skříně. Nejsložitější model a velice dlouhá doba výpočtu v současné době nedovoluje sledovat vliv provozních podmínek. Rozšíření této problematiky může být cílem dalších studií.

Práce byla zhotovena ve spolupráci se společností Wikov MGI a.s., pro kterou byl zmíněný problém řešen. Požadavky na konkrétní uvažované případy byly zadány společností na základě zkušeností s návrhem a s provozem převodových skříní.

2. Úvod do problematiky

2.1 Převodové skříně

Převodová skříně (obr. 2.1) má několik hlavních funkcí. Především je to obálka držící pohromadě celé převodové soustrojí. Skládá se většinou ze spodní a horní části, víček a těsnění. Její součástí jsou domky pro montáž ložisek, napouštěcí a vypouštěcí otvor, případně olejznak.

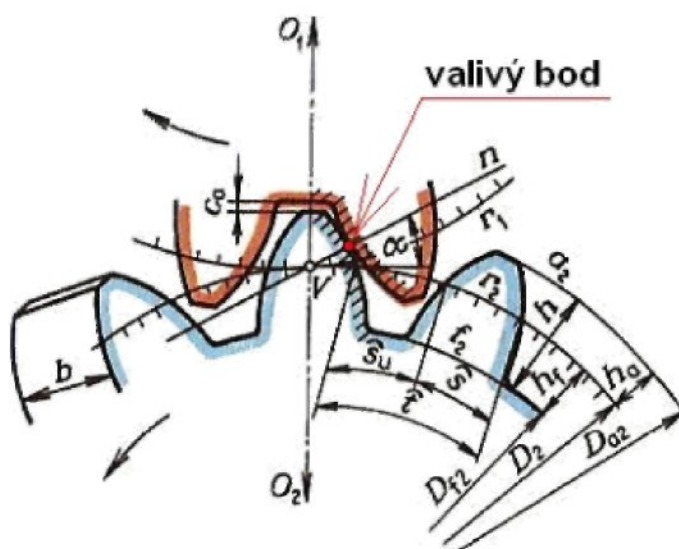


Obr. 2.1 - čelní převodová skříně [9]

2.2 Vznik tepla

Pro jednoduchost je uvažována dvojice kol v záběru - pastorek a kolo s evolventním ozubením. Boky spoluzabírajících zubů se v ideálním případě dotýkají ve valivém bodě (valivé přímce) a vzájemně se po sobě odvalují po záběrové úsečce (obr. 2.2).

Vlivem montáže, výrobních úchylek, průhybu hřídele a dalších parametrů však dochází k smykovému pohybu boků spoluzabírajících zubů a tím, za působení tření, ke vzniku tepla. Generované teplo je z důvodu snížení pevnostních vlastností použitých materiálů nutno z místa záběru odvádět pomocí maziva - oleje.



Obr. 2.2 - náčrtek záběru dvou kol se základními parametry ozubení [6]

2.3 Mazání

V uvažované převodové skříni je mazání ozubených kol realizováno rozstřikovací metodou. Převodová skříň je naplněna olejem do takové výšky, aby se alespoň jedno kolo, které je v záběru, brodilo v olejové lázni, a bylo tak rozstřikem zajištěno, že se olej dostane do požadovaných míst. Mazání ložisek může být realizováno prostřednictvím kapsy umístěné v horní části skříně. Kapsa odvádí pomocí kanálku olej k ložiskům.

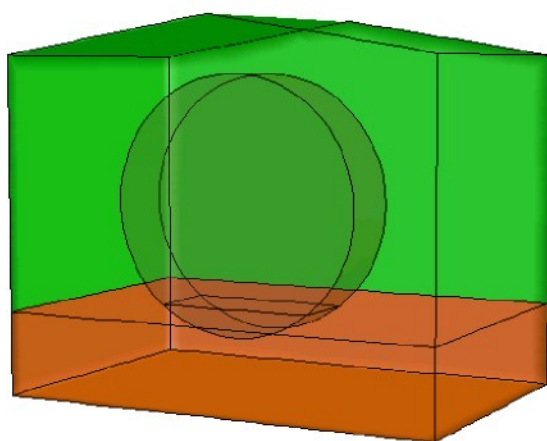
3. Postup řešení

Pro reálný problém byl sestaven matematický model, který popisuje vícefázové nestacionární proudění nestlačitelné tekutiny včetně uvažovaných okrajových podmínek. Na základě konkrétních rozměrů převodové skříně a parametrů ozubených kol byla připravena výpočetní síť (pro jednoduchý případ osamoceného ozubeného kola, soukolí a pro složitý případ uvažované celé převodové skříně). Pro názornější pozorování dvoufázového rozhraní byla pro každý myšlený případ řešení vytvořena animace proudění.

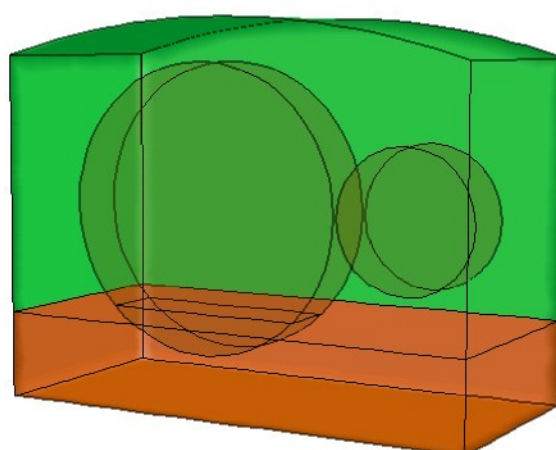
3.1 Tvorba sítě

3.1.1 Tvorba základního modelu

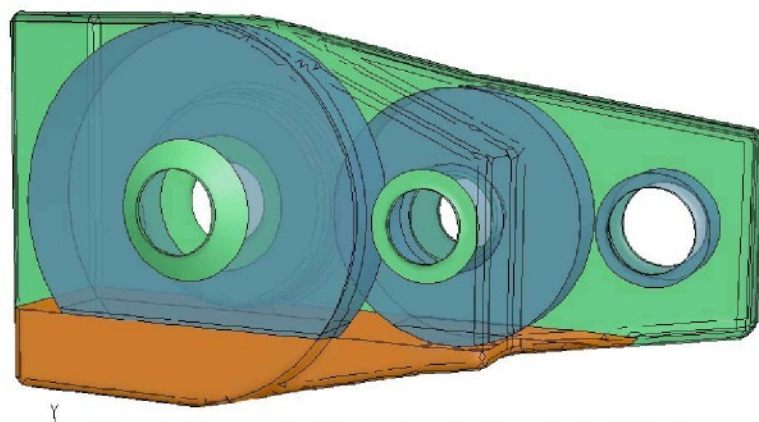
Model převodové skříně, včetně výpočetní sítě a definice typu okrajových podmínek, byl pro osamocené kolo a soukolí vytvořen v programu Gambit. Základní objem modelu celé převodové skříně byl vytvořen v programu Pro Engineer Wildfire 2 a následně doplněn sítí spolu s okrajovými podmínkami opět v programu Gambit. Pro definování jednotlivých fází byla v programu Fluent zvolena metoda přiřazování objemů. Bylo proto nutno už v počátku vytvořit model, který bude obsahovat dva oddělené objemy - jeden pro vzduch a druhý pro olej. Vytvořené modely jsou zobrazeny níže (obr. 3.1a až 3.1c), zelená barva značí objem určený pro přiřazení vzduchu a oranžová barva objem pro přiřazení oleje. Transparentně je též naznačeno umístění ozubených kol.



Obr. 3.1a – model převodové skříně pro osamocené kolo



Obr. 3.1b – model převodové skříně pro soukolí



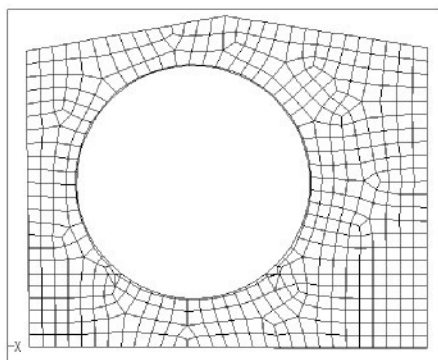
Obr. 3.1c – model kompletní převodové skříňe

3.1.2 Vysít'ování modelu

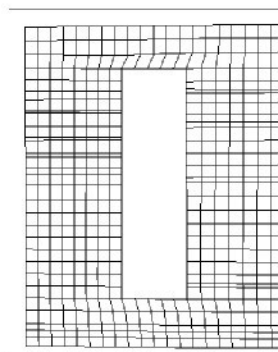
Dříve zmíněné objemy byly vyplněny automaticky generovanou sítí šestiuzových či osmiuzlových elementů. Hlavním určujícím parametrem pro hustotu sítě, a s tím spojeným počtem elementů, se stala doba výpočtu do ustáleného stavu. Bylo provedeno několik testovacích úloh v závislosti na různém počtu elementů a při daném časovém kroku se sledovala předpokládaná doba výpočtu. U modelu soukolí bylo nutno následkem blízké vzdálenosti sousedních ploch v místě styku ozubených kol síť zjemnit. Nízká hustota sítě totiž zvyšovala pravděpodobnost vzniku velkého rozdílu mezi nejmenším a největším elementem, a tudíž ke vzniku komplikací během výpočtu. Následně jsem zvolil pro oba případy takovou hustotu sítě, aby doba výpočtu byla časově únosná. Nižší počet elementů samozřejmě zvyšuje nepřesnost výpočtu, ovšem v tomto případě samotné zjednodušení skryté v modelu převodové skříňe představuje daleko vyšší chybu řešení, než je vliv sníženého počtu elementů.

Model osamoceného ozubeného kola

Síť obou objemů tvoří 13530 osmiuzlových elementů. Objem nejmenšího elementu je $2.184233 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ a největšího $1.56663 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ (obr. 3.2a a 3.2b).



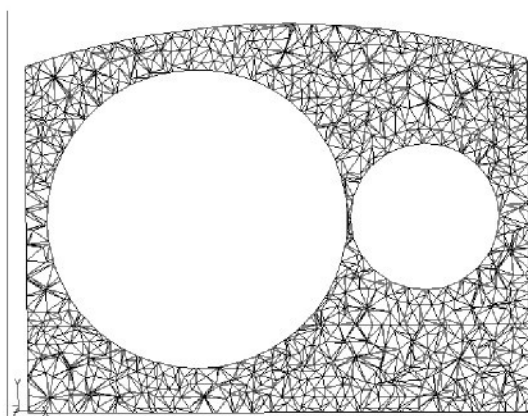
Obr. 3.2a – struktura sítě při pohledu zepředu



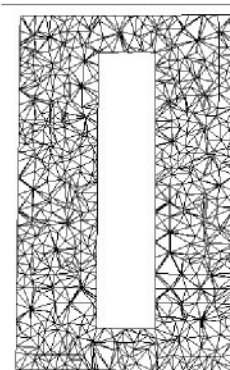
Obr. 3.2b – struktura sítě při pohledu z boku

Model soukolí

Jak již bylo řečeno, z důvodu těsného přiblížení ozubených kol bylo nutno volit hustotu sítě vyšší, aby nevznikal přílišný rozdíl mezi největším a nejmenším elementem. Síť obou objemů tvoří 38061 šestiuzlových elementů. Objem nejmenšího elementu je $2.171087 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$ a největšího $5.828198 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ (obr. 3.3a a 3.3b).



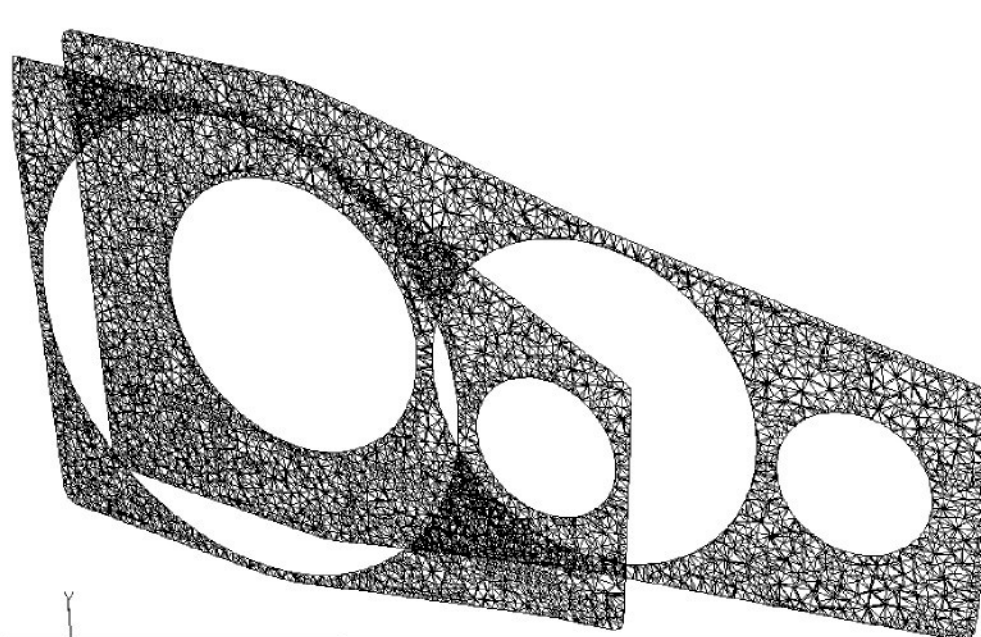
Obr. 3.3a – struktura sítě při pohledu zepředu



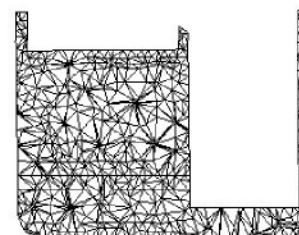
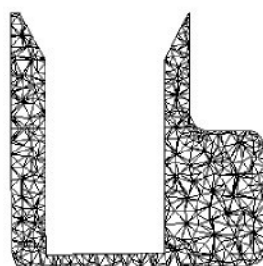
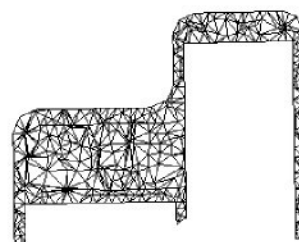
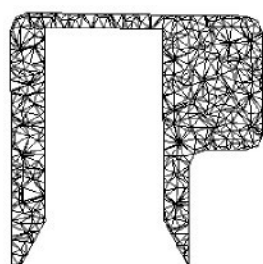
Obr. 3.3b – struktura sítě při pohledu z boku

Model kompletní převodové skříně

Jedná se o model nejsložitější, o nejvyšším počtu elementů, čemuž odpovídá doba výpočtu. Vzhledem k náročnosti modelu není uvažováno přiblížení kol, které simuluje vliv vytlačení oleje v místě záběru kol. I přes toto zjednodušení je model nestabilní a je nutno výpočet začínat s časovým krokem $t = 10^{-8}$ s. Sít' obou objemů tvoří 164132 šestiuzlových elementů. Objem nejmenšího elementu je $2.597004 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$ a největšího $3.463248 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$ (obr. 3.4a až 3.4c).



Obr.3.4a – řez sítí modelu kompletní převodové skříně ve dvou rovinách



*Obr.3.4b – boční pohled na strukturu sítě
v rovině výstupního hřídele*

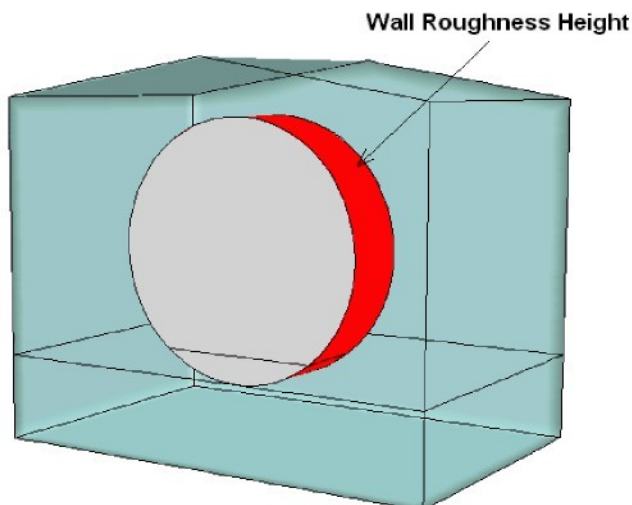
*Obr.3.4b – boční pohled na strukturu sítě
v rovině předlohového hřídele*

3.2 Zjednodušující předpoklady

3.2.1 Modelování ozubení

Prvním způsobem modelování ozubení je vytvoření modelu reálného ozubeného kola, kterému se za použití adaptivní sítě udělí rotační pohyb. Dvoufázové proudění a vysoká rychlost otáčení ozubených kol jsou parametry, které výpočet značně komplikují. Proto, z důvodu velkých nároků na výpočetní čas, nebyl tento postup realizován.

Namísto toho bylo přikročeno ke zjednodušení v podobě matematicky modelované drsnosti. Na povrch kotouče o průměru patní kružnice ozubeného kola (obr. 3.4) byla v programu Fluent definována výška stěnové drsnosti „Wall Roughness Height“. Výška odpovídá výšce zubu ozubeného kola při $m = 6$, tj. 14 mm. Jelikož se tato práce zabývá především chováním hladiny olejové lázně, případně dostřikem oleje, má toto zjednodušení na přesnost výpočtu zanedbatelný vliv.



Obr. 3.4 – znázornění umístění modelované drsnosti na ozubené kolo

3.2.2 Rozstřík oleje v případě soukolí ozubených kol

V praxi dochází prostřednictvím brodění jednoho ozubeného kola v olejové lázni k přenosu oleje na další členy v převodové skřini. Část oleje se ale v místě záběru s druhým kolem setká s boky spoluzabírajících zubů a je vrácena zpět do olejové lázně. V práci byly testovány dva způsoby, jak tohoto efektu docílit. Oba dva v principu vytvářejí štěrbinu odpovídající množství oleje, které v praxi projde přes místo záběru a zůstane na ozubeném kole.

a) Stanovení množství oleje místem záběru

Vycházel jsem z úvahy vztahující se na jednu zubovou mezeru. Olej nabíraný brodicím se kolem bude spoluzabírajícím kolem vytlačen do stavu, který je zobrazen na obr.3.5b. Zároveň 1/3 takto získaného množství odečte po stranách kola. Následující vztahy vedou ke stanovení šířky štěrbiny:

$$Z = 59 \quad m = 6 \quad b = 74 \text{ mm} \quad h = 13,5 \text{ mm} \quad D_f = 372,5 \text{ mm} \quad n = 250 \text{ min}^{-1}$$

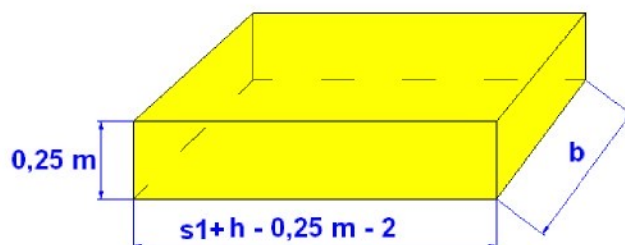
$$\frac{2\pi}{Z} \cdot \frac{D_f}{2} = 2s_1 \Rightarrow s_1 = \frac{\pi D_f}{2Z} = 9,9 \text{ mm}$$

$$V' = (s_1 + h - 0,25m - 2) \cdot 0,25m \cdot b = 2210 \text{ mm}^3$$

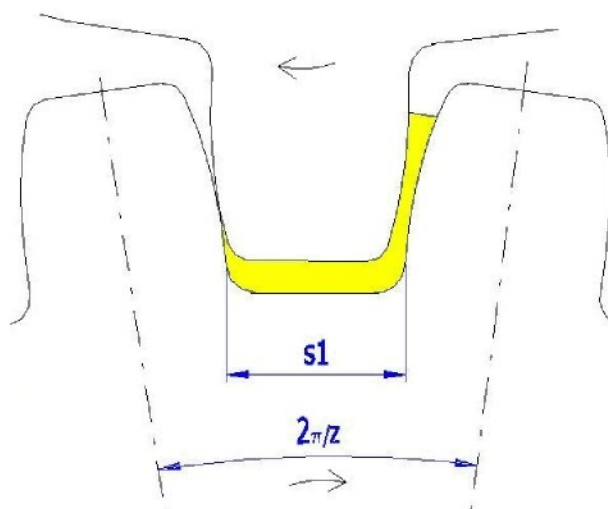
$$\dot{V}_c = \frac{2}{3} V' \cdot Z \cdot \frac{n}{60} = 0,362 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{hod}$$

$$v = 2\pi \frac{D_f}{2} \frac{n}{60} = 4,87 \text{ m/s}$$

$$a = \frac{\dot{V}_c}{v \cdot b} = 1 \text{ mm}$$



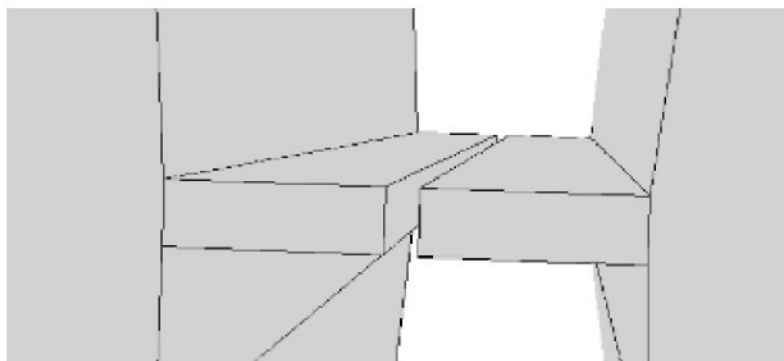
Obr. 3.5a – myšlený objem oleje v jedné zubové mezeře



Obr. 3.5b – stav oleje po vytlačení spoluzabírajícím kolem – horní kolo hnací, spodní hnané

b) Varianta vytvoření překážky

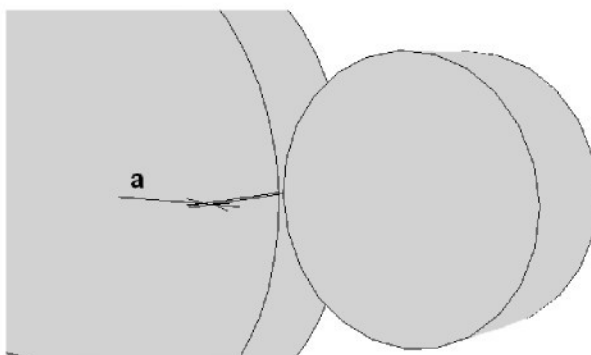
Byla ponechána původní osová vzdálenost a do místa záběru umístěna překážka se štěrbinou (obr.3.6). Tím však došlo k vytvoření detailního prvku v modelu, což mělo za následek nutnost podstatného navýšení počtu elementů a prodloužení výpočetního času. Zároveň také tok oleje štěrbinou není závislý pouze na její šířce, ale i na proudění u překážky. Proto bylo přikročeno k variantě přiblížení ozubených kol.



Obr. 3.6 – překážka se štěrbinou

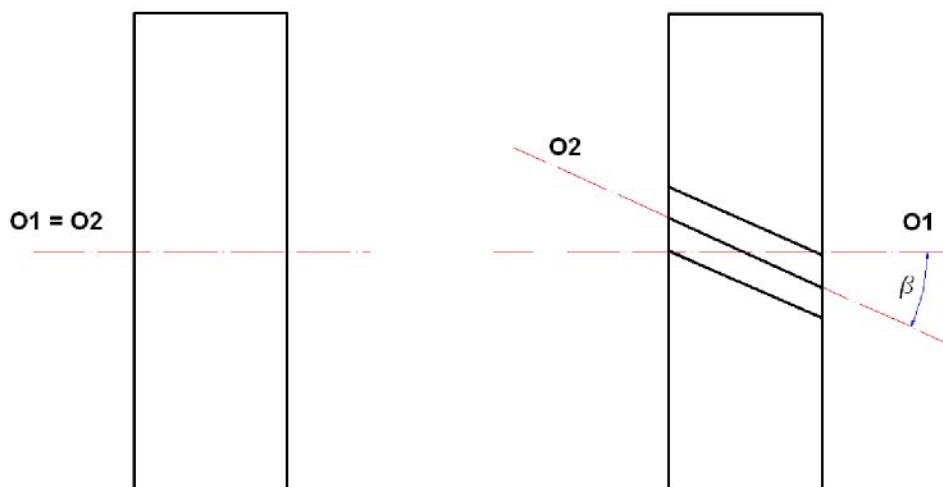
c) Varianta přiblížení ozubených kol

Ozubená kola jsou z klasické osové vzdálenosti $a' = (D_1 + D_2)/2$ k sobě přiblížena na vzdálenost velikosti štěrbin $a = 1 \text{ mm}$ (obr.3.7). Nedochozí k vytvoření dalších detailních prvků v modelu, a tak není nutné lokální ani celkové zjemnění sítě.

Obr. 3.7 – přiblížení kol na vzdálenost a

3.3 Šikmé ozubení

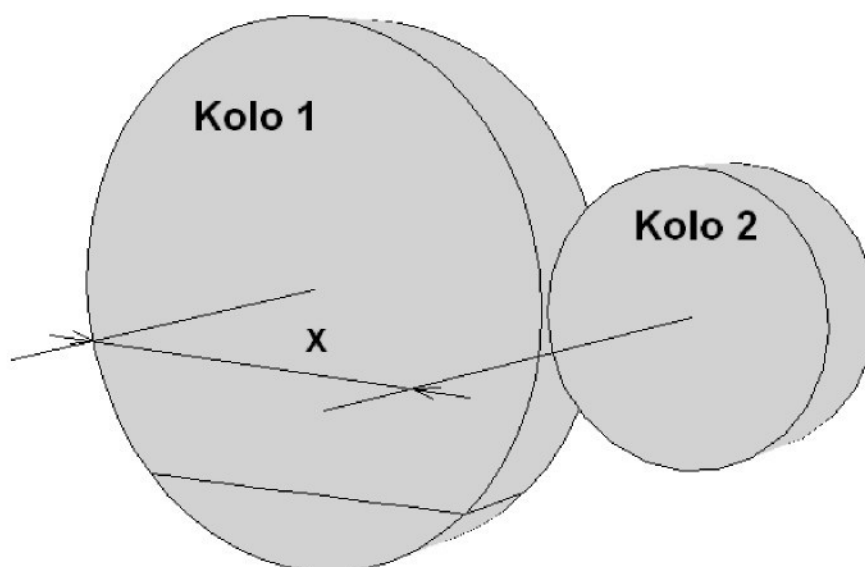
Jak již bylo zmíněno dříve (kap. 3.2.1), vliv ozubení byl nahrazen matematicky modelovanou drsností. Otáčivý pohyb kol je potom definován úhlovou rychlostí a osou rotace této plochy. Pokud je osa rotace modelované drsnosti (O_2) shodná s osou ozubeného kola (O_1), simuluje se tak vliv přímého ozubení (obr. 3.8a). V případě, že se natočí osa rotace drsnosti o určitý úhel vůči ose kola, lze tak simulovat vliv šikmého ozubení (obr. 3.8b).



*Obr. 3.8a – pozice os při uvažování
přímého ozubení*

*Obr. 3.8b – pozice os při uvažování
šikmého ozubení*

V případě soukolí ozubených kol má druhé kolo opačný smysl stoupání šroubovice ($\beta_1 = -\beta_2$). Rovněž je nutno uvažovat posunutí osy rotace modelované drsnosti druhého kola (obr.3.9).

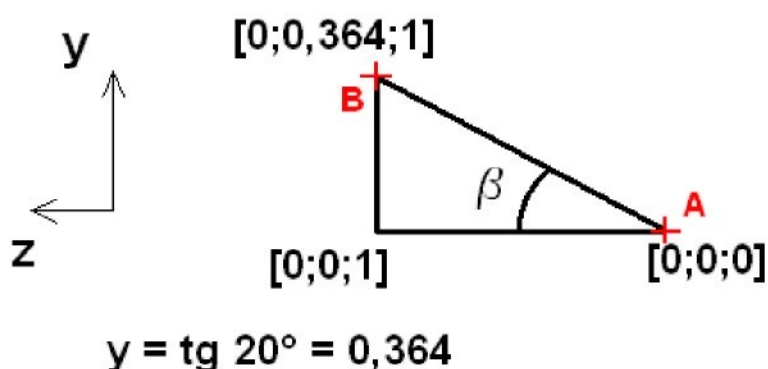


Obr. 3.9 – osová vzdálenost přiblížených kol

Osy rotace jsou definovány pomocí dvou bodů v prostoru, v tab.1 jsou zobrazeny souřadnice jednotlivých bodů dle úlohy a výpočet vychází z obr.3.10.

Tab. 1 – souřadnice bodů

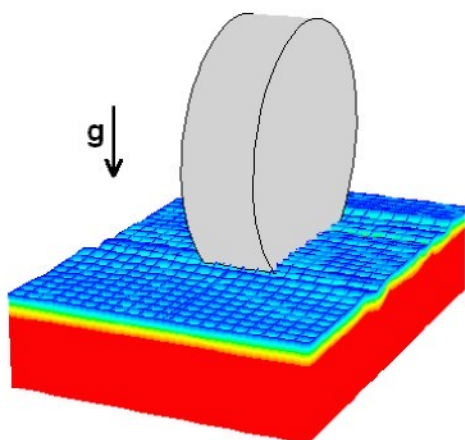
	Souřadnice	Počáteční bod - A	Směrový bod - B
Osamocené kolo	X	0	0
	Y	0	0,364
	Z	0	1
Soukolí - kolo 1	X	0	0
	Y	0	0,364
	Z	0	1
Soukolí - kolo 2	X	0,285	0,285
	Y	0	-0,364
	Z	0	1



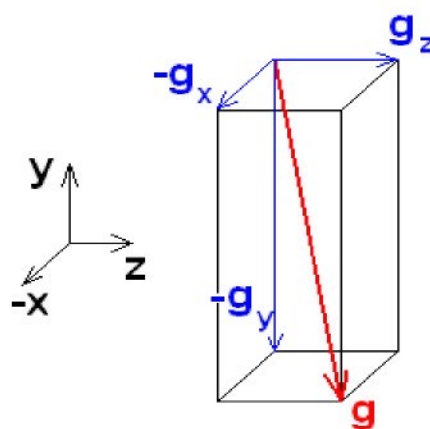
Obr. 3.10 – bezrozměrné hodnoty souřadnic bodů v rovině náklonu osy rotace modelované drsnosti

3.4 Naklánění převodové skříně

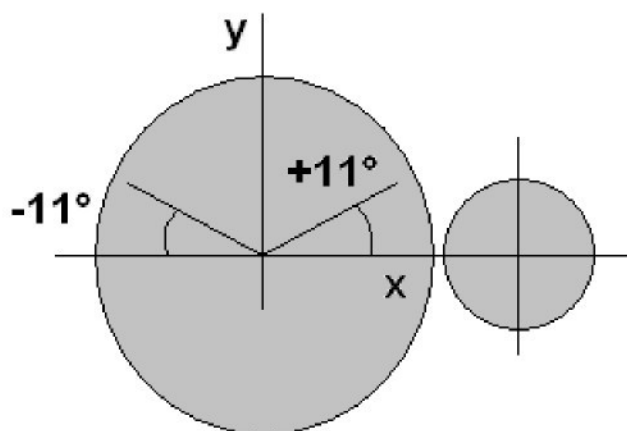
Postihnutí provozních stavů jako je rozjezd, zastavení, změna sklonu vozovky a změna směru jízdy dopravního prostředku, jehož je převodová skříň součástí, byla simulována pomocí různých úhlů sklonu hladiny olejové lázně. Různého sklonu bylo dosaženo pomocí změny směru působení gravitačního zrychlení. Jedná se o velice jednoduchý a efektivní způsob. V klidovém stavu hladiny působí zrychlení kolmo na hladinu směrem dolů (obr. 3.11). Při náklonu dojde k rozložení zrychlení do složek g_x , g_y a g_z (obr. 3.12). Hodnoty těchto složek jsou zobrazeny v tab.2. Simulace byla provedena pro úhly podélného náklonu $+11^\circ$ a -11° , příčného náklonu $+6^\circ$ a -6° a jejich kombinace. Podélný náklon probíhá v rovině kolmé na osu rotace ozubeného kola (obr. 3.12a), příčný náklon pak v rovině řezu ozubeným kolem (obr. 3.12b).



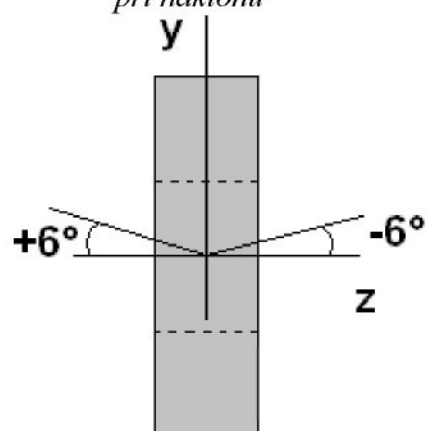
Obr. 3.11 – klidový stav hladiny



Obr. 3.12 – rozložení zrychlení do složek při náklonu



Obr. 3.12a – podélný náklon kola / soukolí



Obr. 3.12b – příčný náklon kola / soukolí

Tab.2 – číselné hodnoty složek zrychlení při různých náklonech hladiny oleje

	náklon			
	podélný +11°	podélný -11°	příčný +6°	příčný -6°
gx	-1,8718	1,8718	0	0
gy	-9,6297	-9,6297	-9,7563	-9,7653
gz	0	0	-1,0254	1,0254

	kombinovaný náklon			
	+11°+6°	-11°-6°	+11°-6°	-11°+6°
gx	-1,8718	1,8718	-1,8718	1,8718
gy	-9,5769	-9,5769	-9,5769	-9,5769
gz	1,0066	-1,0066	-1,0066	1,0066

Problematika provozních stavů převodových skříní je velice komplexní úlohou. Vystupuje zde celá řada parametrů, jejichž úplné popsání a zahrnutí do simulace by v podstatě zvýšilo dobu potřebnou pro výpočet na neúnosnou mez. Proto těchto několik úloh představuje základní pohled do problematiky mazání a snaží se postihnout kombinaci základních dějů, které mohou v převodové skříní nastat.

3.5 Vliv viskozity

Při záběru ozubených kol dochází, přes veškerou snahu, ke vzniku tepla. Teplo je odváděno olejem, který má také snížit v místě záběru tření. Během tohoto procesu se samozřejmě olej také ohřívá, přičemž zvýšení teploty má významný vliv na jeho mechanické vlastnosti – především viskozitu. Ohřev oleje ve skříní je dlouhodobý proces, jehož simulace, při uvažování změny viskozity s teplotou, je úlohou velice náročnou.

Proto byla z dostupných informací o běžně používaných olejích pro mazání převodových skříní stanovena přibližná závislost viskozity na teplotě (tab.3). Následně pak bylo vytvořeno 5 samostatných izotermních simulací při různých hodnotách viskozity.

Tab.3 – hodnoty dynamické viskozity v závislosti na teplotě

Teplota (°C)	Dynamická viskozita η (Pa.s)
20	1,106
35	0,855
50	0,603
65	0,352
80	0,1

3.6 Nastavení programu Fluent

Po vytvoření sítě v programu Gambit byl tento soubor načten do programu Fluent. Zde byli nastaveny počáteční a okrajové podmínky, způsob řešení, model turbulence, užití materiály a podobně. Detailnější popis nastavených veličin následuje níže.

3.6.1 Použitý model turbulence

Pro řešení úlohy jsem zvolil model $k - \omega$, protože je pro nevyvinuté turbulentní nestacionární proudění nejvhodnější. Reynoldsovo číslo se pohybuje v oblastech 10^4 . Charakteristickým rozměrem při výpočtu Reynoldsova čísla je průměr velkého kola či šířka ozubení. Jedná se o dvourovnicový turbulentní model, který poprvé představil Dr. Wilcox. Tento model zahrnuje řešení transportních rovnic pro turbulentní kinetickou energii k a specifickou rychlost disipace ω . Informativně uvádím obě transportní rovnice (Obr.3.13a a Obr. 3.13b).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k$$

Obr. 3.13a – transportní rovnice pro turbulentní kinetickou energii [3]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega$$

Obr. 3.13b – transportní rovnice pro specifickou rychlost disipace [3]

Soustava dvou rovnic $k - \omega$ modelu je doplněna vztahy a dalšími konstantními hodnotami, které uzavírají soustavu rovnic[8].

3.6.2 Vícefázový model

Pro řešení dvoufázového systému olej – vzduch, jsem zvolil vícefázový model Volume Of Fluid (VOF) s interpolačním schématem Geometric Reconstruction.

Tento model je navržen pro řešení systému dvou a více nemísitelných fází, kde oblastí zájmu je pozice rozhraní mezi fázemi [3]. Jediný soubor momentových rovnic je sdílen tekutinami a v celé oblasti je v každé výpočetní buňce sledován hmotnostní zlomek pro každou z fází

Formulace VOF je založena na předpokladu, že dvě a více uvažovaných fází nelze mezi sebou zcela mísit. V řešené buňce je pro každou fázi uvedena jedna proměnná objemového zlomku fáze. V kontrolním objemu je součet objemových zlomků všech fází roven jedné. Vlastnosti a proměnné všech oblastí jsou sdíleny všemi fázemi. Oblasti jsou

reprezentovány objemově průměrovanými hodnotami. V dané oblasti je znám objemový zlomek každé fáze. Tímto způsobem jsou vlastnosti a proměnné daných buněk čistě reprezentativní pro jednu z fází nebo pro směs fází – v závislosti na hodnotě objemového zlomku. Jinak řečeno, jestliže q -tá objemová složka v buňce je označena jako α_q , pak je možno psát následující 3 podmínky:

$\alpha_q = 0$, buňka neobsahuje q -tou tekutinu

$\alpha_q = 1$, buňka je q -tou tekutinou zcela zaplněna

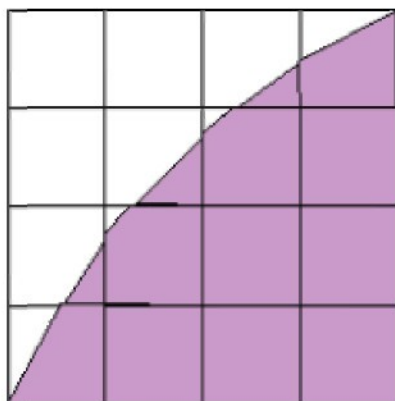
$0 < \alpha_q < 1$, buňka obsahuje rozhraní mezi q -tou tekutinou a jednou nebo více dalšími tekutinami.

V závislosti na lokální hodnotě α_q jsou přiřazeny příslušné vlastnosti a proměnné každému kontrolnímu objemu v celé oblasti.

Geometric reconstruction schéma

Používá se pro interpolaci v blízkosti fázového rozhraní. Při použití geometric reconstruction jsou buňky, které se blíží fázovému rozhraní (obsahují podíl obou fází) řešeny pomocí tohoto schématu, a ostatní buňky, které jsou kompletně vyplněny jednou nebo druhou fází, jsou řešeny pomocí standardního interpolačního schématu použitého ve Fluentu.

Geometric reconstruction schéma reprezentuje rozhraní mezi fázemi použitím po částech lineárního přiblížení. Ve Fluentu je toto schéma nejpřesnější a je použitelné pro nestrukturovanou síť. Schéma je zobecněno pro nestrukturalizovanou síť podle D. L. Younga [7]. To předpokládá, že rozhraní mezi dvěma fázemi má v každé buňce lineární průběh a užívá tento lineární tvar pro kalkulaci přenosu tekutiny skrze stěnu buňky (Obr. 3.14).



Obr. 3.14 – tvar rozhraní reprezentovaný geometric reconstruction (po částech lineárním) schématem [3].

3.6.3 Celkový postup nastavení

1, Načtení souboru z Gambitu - pomocí příkazu **File** $\Rightarrow$ **Read** $\Rightarrow$ **Case**

Načtení sítě s koncovkou *.msh.

2, Definování řešiče – **Define** $\Rightarrow$ **Model** $\Rightarrow$ **Solver**

Nastavení řešiče „segregated“, který řeší postupně rovnici kontinuity a tři složky Navier – Stokesových rovnic, implicitní schéma pro nestacionární proudění, přesnost druhého řádu.

3, Nastavení vícefázového proudění – **Define** $\Rightarrow$ **Model** $\Rightarrow$ **Multiphase**

Nastavení modelu Volume Of Fluid (VOF) a jeho schématu „Geo-Reconstruct“, povolení „Solve VOF every iteration“ a „Implicit body forces“ zpřesňuje řešení.

4, Nadefinování modelu turbulence – **Define** $\Rightarrow$ **Model** $\Rightarrow$ **Viscous**

Model k- ω standard; povolení „Transitional flows“ zahrnuje řešení s uvažováním vzniku zpětných proudů v objemu.

5, Nadefinování materiálů – **Define** $\Rightarrow$ **Materials**

Olej – $\eta = 1,06 \text{ Pa.s}$, $\rho = 889 \text{ kg/m}^3$

Vzduch - $\eta = 1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

6, Přiřazení jednotlivých fází – *Define* $\Rightarrow$ *Phase*

Fáze 1 – vzduch, fáze 2 – olej; přiřazení je nutné z důvodu pozdější manipulace s fázemi, zobrazování výsledků apod.

7, Operační podmínky – *Define* $\Rightarrow$ *Operation Condition*

Nastavení atmosférického tlaku $p_a = 101,325$ kPa. Pro vícefázové proudění – nastavení „specific operation density“ na hustotu vzduchu $\rho = 1,225$ kg/m³. Dle Tab.2, kapitola 3.4, nastavení gravitačního zrychlení dle uvažovaných náklonů.

8, Okrajové podmínky – *Define* $\Rightarrow$ *Boundary Condition*

Stěny i kolo(a) převodové skříně nastaveny na „Wall“

9, Nastavení kola (kol) – *Define* $\Rightarrow$ *Boundary Condition* $\Rightarrow$ výběr kotouče $\Rightarrow$ záložka *Momentum*

- Matematicky modelovaná drsnost – „Wall Roughness“ – hodnota „Roughness Height“ na 0,014 m, „Roughness Constant“ na 0.
- Nastavení rotačního pohybu – „Motion“ – „Rotational“
- Nastavení osy rotace (neplatí pro přímé ozubení) – „Rotation axys origin“ a „Rotation axys direction“ hodnoty dle Tab.1, kapitola 3.3.
- Nastavení rychlosti otáčení – „Speed“ – $n = 250 \text{ min}^{-1}$, $\frac{n}{60} \cdot 2\pi = 26,2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

10, Další nastavení řešení – *Solve* $\Rightarrow$ *Controls* $\Rightarrow$ *Solution*

Tabulka „discretizations“:

„Pressure“ – „PRESTO!“ - nastavení vhodné pro vysokorychlostní rotační proudy

„Pressure-velocity coupling“ – „PISO“ (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) – doporučeno pro veškeré operace zahrnující zpětné proudění.

„Momentum“, „Turbulent kinetic energy“ a „Specific dissipation rate“ – vše „Second order Upwind“

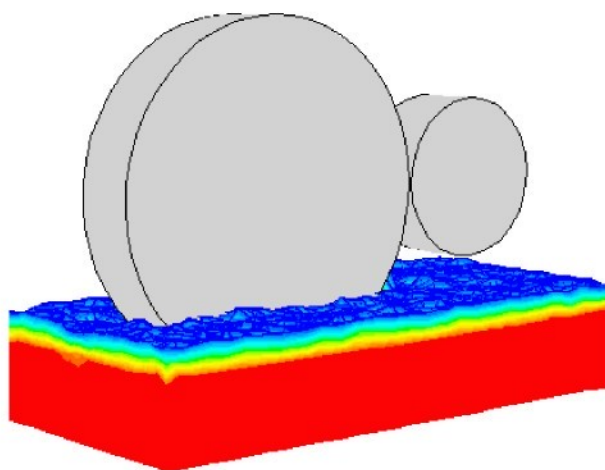
11, Inicializace řešiče – *Solve* ⇒ *Initialize* ⇒ *Initialize*

Nastavení počátečních podmínek řešení; stanovení nulových hodnot rychlostí na všechny místa sítě kromě určitých okrajových podmínek.

12, Přirazení fází jednotlivým objemům v modelu - *Solve*⇒*Initialize* ⇒*Patch*

Před samotným řešením je nutno programu sdělit, jaké procentuální množství jednotlivých fází se nachází v obou objemech.

V kolonce „Zones to patch“ jsem vybral oblast, ve které je nutno definovat podíl oleje (jedná se o olejovou lázeň), z menu „Phase“ jsem vybral „Phase 2“ a hodnotu proměnné „Volume fraction“ nastavil na „1“. Pro kontrolu jsem zobrazil kontury fáze 2 po této úpravě (Obr. 3.15).



Obr. 3.15 – kontury fáze 2 – červená barva představuje objem o 100% koncentraci oleje

13, Monitorování reziduí – *Solve* ⇒ *Monitors* ⇒ *Residual*

V paměti zůstává uloženo posledních 500 iterací, pro názornost je jich zobrazeno pouze 150. Všechna kritéria konvergence jsou nastavena na 10^{-4} z důvodu proběhnutí všech iterací v rámci časového kroku, a tak vyšší stabilitě řešení.

14, Monitorování objemů – Solve $\Rightarrow$ Monitors $\Rightarrow$ Volume

Sleduje se dosažení stavu stacionárního či nestacionárního ustáleného stavu proudění.

15, Nastavení animací – Solve $\Rightarrow$ Animate $\Rightarrow$ Define

Animace je ideálním nástrojem pro názorné zobrazení dějů odehrávajících se v převodové skříní.

16, Časový krok, počet kroků a spuštění výpočtu – Solve $\Rightarrow$ Iterate

Z provedených testovacích úloh jsem určil čas potřebný na výpočet do ustáleného stavu na $t = 5$ s. Při rozběhu kola se systém nachází v klidu a skokově se dostává do relativně vysokých rychlostí, což má za následek nestabilitu řešení při velikosti časových kroků 10^{-3} až 10^{-4} s. Proto jsem volil u všech modelů počáteční krok 10^{-6} s, který jsem cca po 1000 krocích postupně zvyšoval až na hodnoty reálné pro výpočet.

- Osamocené ozubené kolo jsem řešil při časovém kroku 0,001 s, což pro konečný čas výpočtu 5 s znamená počet 5000 kroků a výpočetní čas cca 2 dny.
- Soukolí ozubených kol, vzhledem k náročnějšímu výpočtu, jsem řešil při časovém kroku 0,0002 s, což vede na 25000 kroků a výpočetní čas cca 10 dní.

4. Výsledky

V počáteční fázi studie bylo sledováno proudění v případě klidné hladiny olejové lázně. Simulace proběhla na modelech osamoceného kola a soukolí. Použité modely jsou záměrně zjednodušené z důvodu uvažování většího množství parametrů při výpočtu. Na řešených úlohách byly též získány informace o základních dobách výpočtu, přičemž byly tyto praktické závěry v konečné části práce aplikovány na rozsáhlejší simulaci toků oleje v celé převodové skříně.

Během provozu převodových soustrojí v konkrétním dopravním prostředku (tramvaje) byly pozorovány největší problémy se snížením životnosti při provozních stavech, kterým odpovídají definované sklony převodové skříně, resp. hladiny oleje. Jedná se o podélný náklon $+11^\circ$ a -11° , příčný náklon $+6^\circ$ a -6° a jejich kombinace.

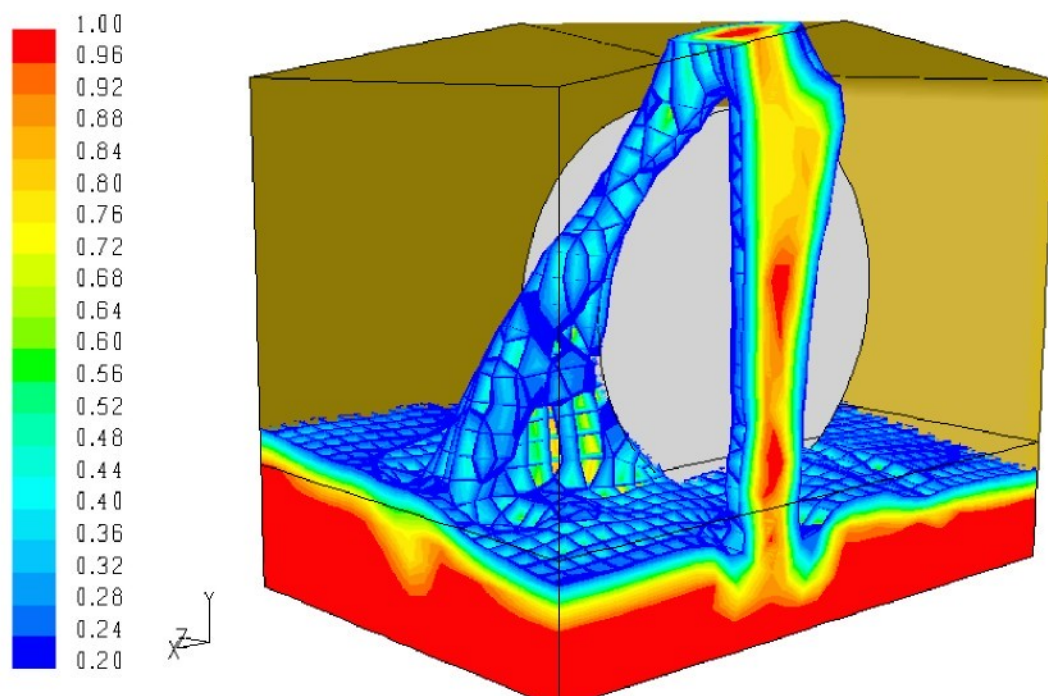
Proto jsou v práci následně zobrazeny výsledky proudění při uvažovaných variantách náklonu hladiny olejové lázně, a to jak pro model osamoceného kola, tak pro model soukolí.

Studie pokračuje modelem kompletní převodové skříně, kde uvažujeme opět klidnou hladinu oleje.

Během provozu převodových skříní dochází k ohřevu oleje, což má za následek změnu jeho vlastností – především viskozity. Zvýšená teplota může olej negativně ovlivnit, a tím zhoršit mazání převodových soukolí. Z tohoto důvodu je v závěrečné fázi práce sledován vliv změny viskozity na charakter proudění ve skříně. Definováno je celkem pět izotermních případů, které odpovídají různým teplotám oleje.

4.1 Vysvětlení zobrazení

Na obr. 4.1 lze vidět proudění oleje v převodové skříně v ustáleném stavu. Okrově jsou znázorněny zadní strany a strop skříně, šedě pak ozubené kolo. Červená barva představuje směs o 100% koncentraci oleje a 0% koncentraci vzduchu. Sytě modrá barva pak pro názornost představuje směs o 20% koncentraci oleje a 80% koncentraci vzduchu (při zobrazení celého rozsahu koncentrací by nebylo možno sledovat děje uvnitř skříně). Oranžová až světle modrá barva představují prostor fázového rozhraní, kde je koncentrace obou fází proměnná.

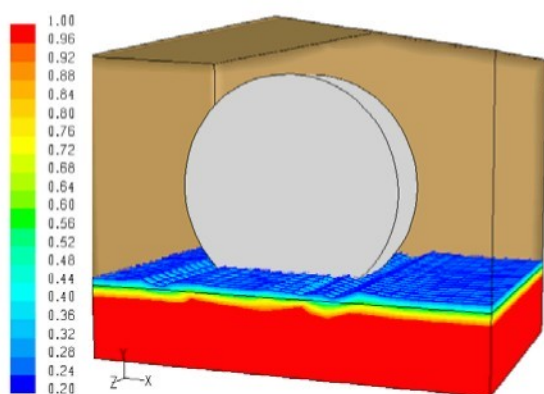


Obr. 4.1 – příklad proudění v převodové skříní

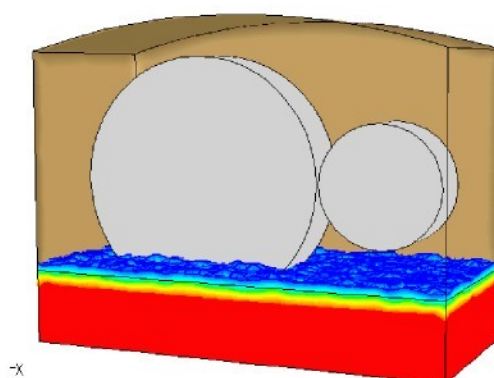
4.2 Klidový stav převodové skříně a počáteční stavy

Klidovým stavem převodové skříně je myšlen rozběh ozubeného kola do ustáleného stavu při hladině oleje rovnoběžné s vodorovnou rovinou. Jinak řečeno, nedochází k žádnému pohybu skříně, a tudíž ani k pohybu hladiny vlivem změny gravitačního zrychlení.

Každý řešený model vychází z počátečního stavu, kdy ozubené kolo či kola jsou v klidu a hladina je rovnoběžná s horizontální rovinou (obr.4.2a a obr.4.2b).



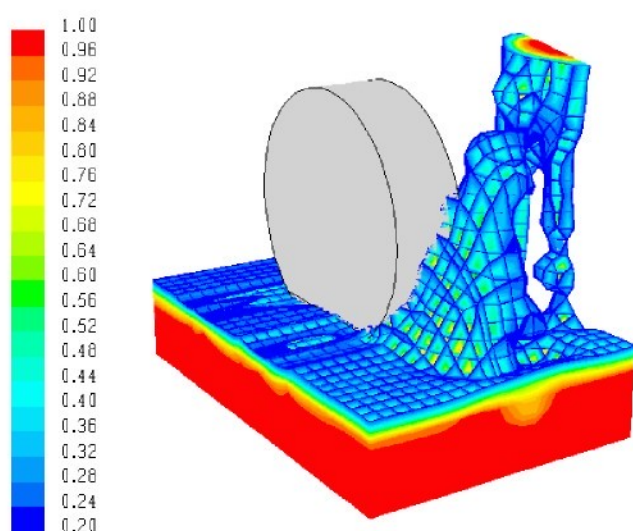
Obr. 4.2a – počáteční stav v případě osamocené kolo



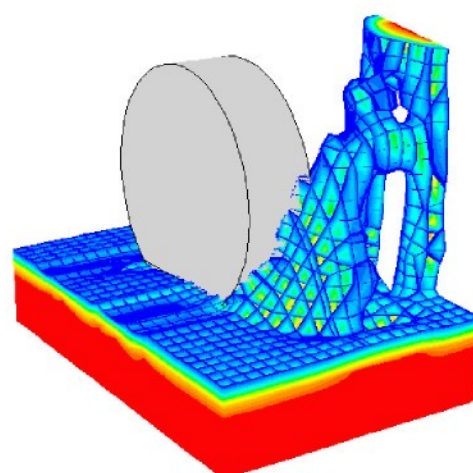
Obr. 4.2b – počáteční stav v případě soukolí

4.2.1 Osamocené kolo se šikmými zuby

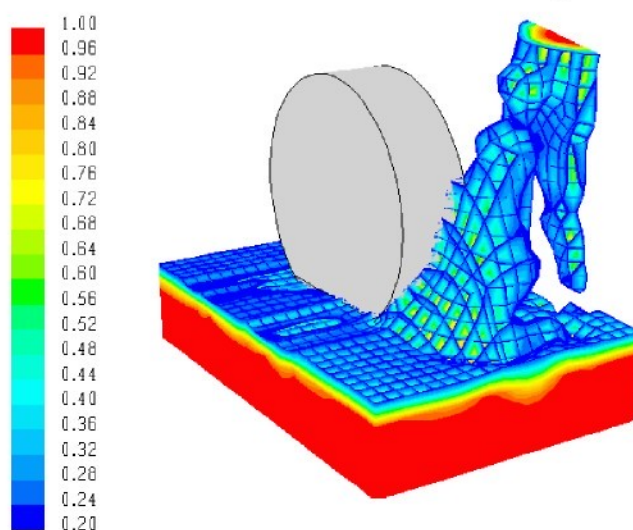
V první fázi bylo sledováno brožení osamocенého kola se šikmými zuby v olejové lázni bez pohybu převodové skříně. Na následujících obrázcích je zachycen vývoj proudění v převodové skříně do ustáleného stavu proudění (obr.4.3a až obr.4.3d).



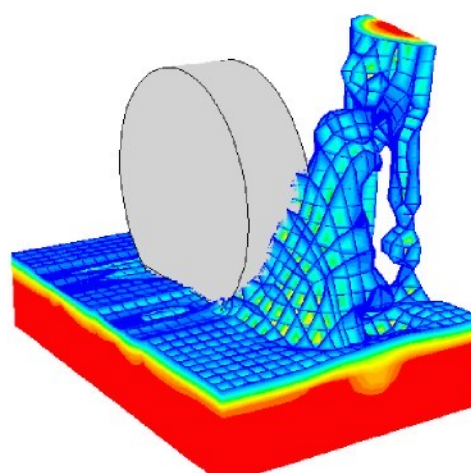
Obr. 4.3a – stav v čase $t = 0,4 \text{ s}$



Obr. 4.3b – stav v čase $t = 1 \text{ s}$



Obr. 4.3c – stav v čase $t = 2 \text{ s}$

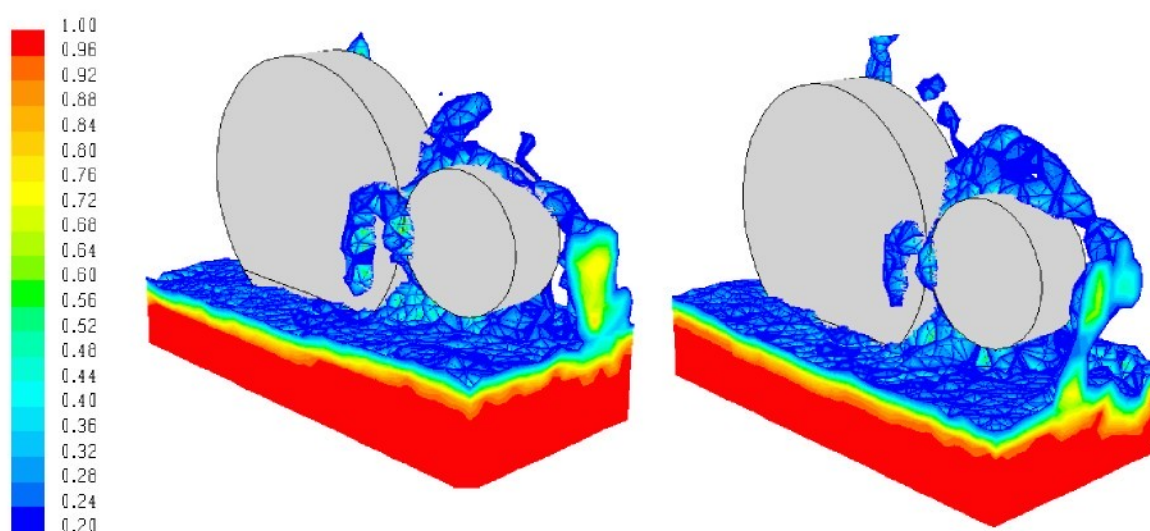


Obr. 4.3d – stav v čase $t = 5 \text{ s}$

Z uvedených obrázků vyplývá, že vlivem pohybu kola dochází k rozkolísání hladiny oleje. Část oleje je též unášena zuby a rozstříkávána po převodové skříně. Při rozběhu je rozstřík oleje nerovnoměrný, s přibývajícím časem se stabilizuje do jednoho proudu.

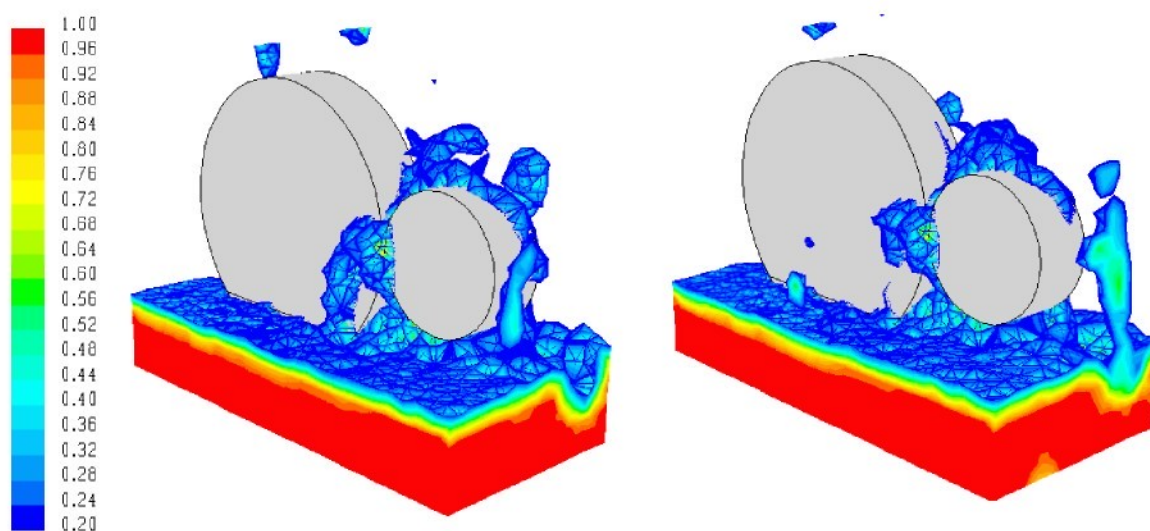
4.2.2 Soukolí se šikmými zuby

Bez pohybu převodové skříně bylo dále sledováno chování oleje u soukolí se šikmými zuby. Na uvedených obrázcích je zachycen vývoj proudění v převodové skříní do ustáleného stavu (obr.4.4a až obr.4.4d).



Obr. 4.4a – stav v čase $t = 0,4$ s

Obr. 4.4b – stav v čase $t = 1$ s



Obr. 4.4c – stav v čase $t = 2$ s

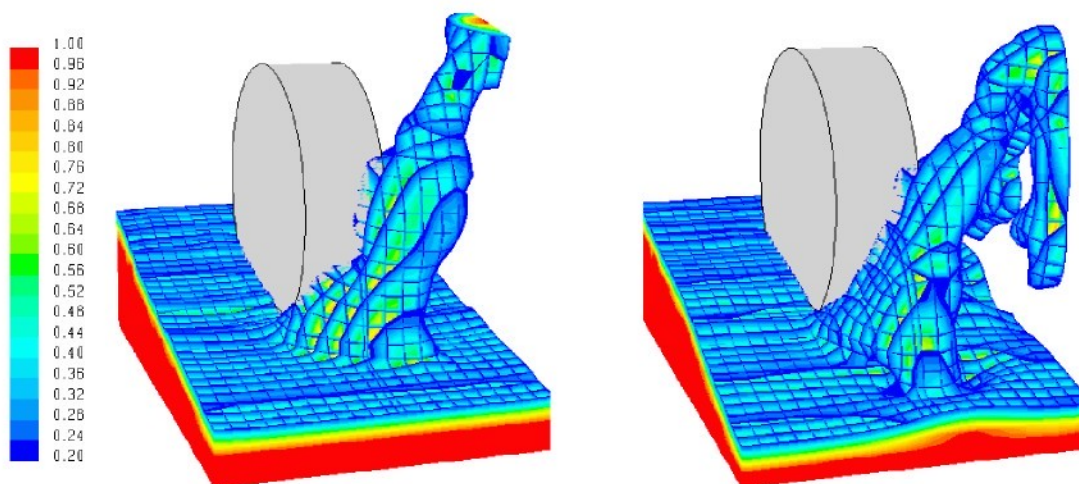
Obr. 4.4d – stav v čase $t = 5$ s

Na počátku záběru kola můžeme sledovat rozkolísání hladiny oleje se zvýšením pod pastorkem. Z časového vývoje je patrné, že s přirůstající dobou, po kterou je soukolí v záběru, dochází k ustálení hladiny oleje. Oproti případu osamocené kola se daleko menší část oleje dostane do kontaktu se stropem skříně. Naopak pastorek v záběru odšťikuje část oleje směrem k nejbližší stěně (např. obr. 4.4c).

4.3 Náklony převodové skříně – osamocené kolo

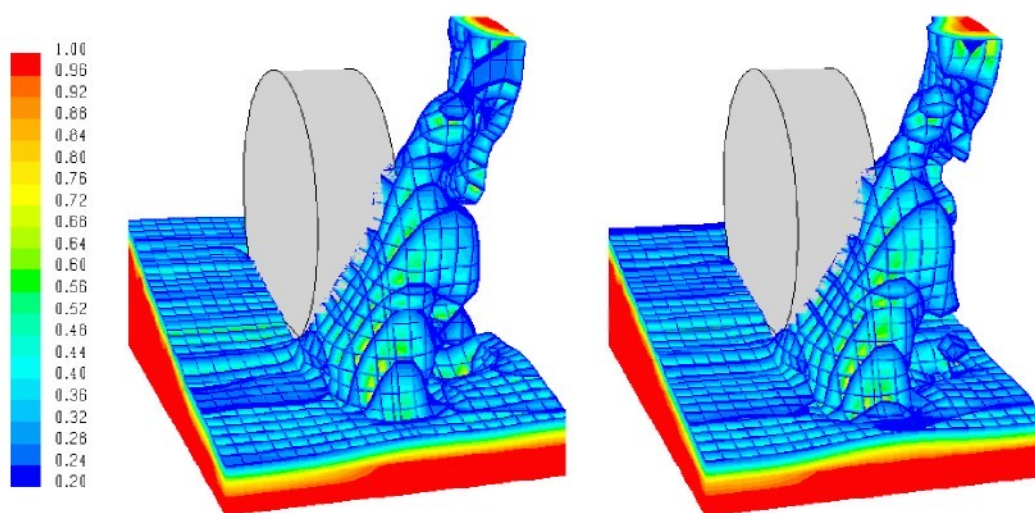
4.3.1 Podélný náklon $+11^\circ$

Jako první pohyb převodové skříně byla zvolena varianta podélného náklonu $+11^\circ$. Na následujících obrázcích je zachycen vývoj proudění v převodové skříně od času $t = 0,4 \text{ s}$ do ustáleného stavu (obr.4.5a až obr.4.5d).



Obr. 4.5a – stav v čase $t = 0,4 \text{ s}$

Obr. 4.5b – stav v čase $t = 1 \text{ s}$



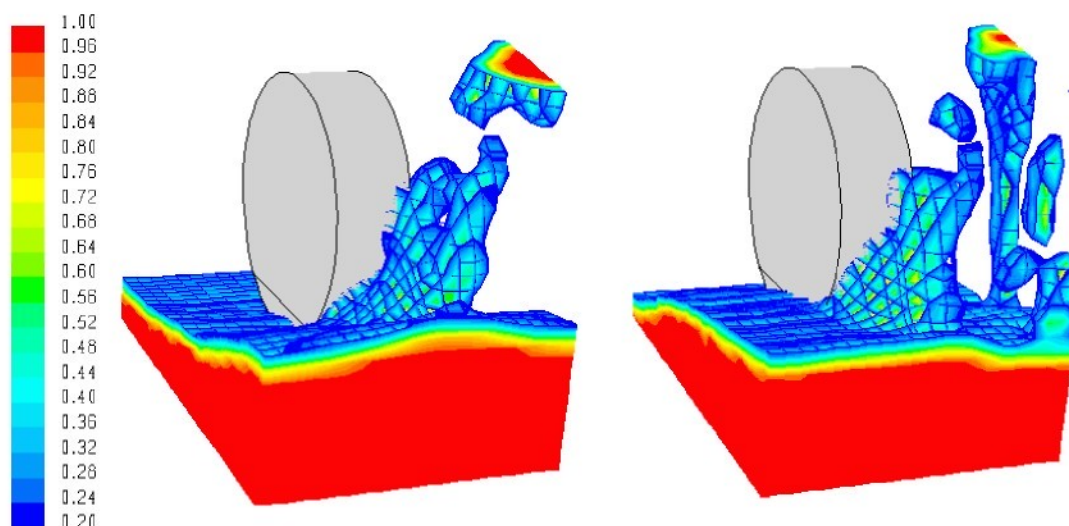
Obr. 4.5c – stav v čase $t = 2 \text{ s}$

Obr. 4.5d – stav v čase $t = 5 \text{ s}$

Z uvedeného vývoje je patrné, že opět dochází k ustálení proudění spolu s časem. Vychýlení hladiny má vliv na změnu směru proudu odstříkovaného ozubeným kolem. Ve fázi rozběhu dopadá většinový proud oleje na zadní stěnu převodové skříně (obr. 4.5b).

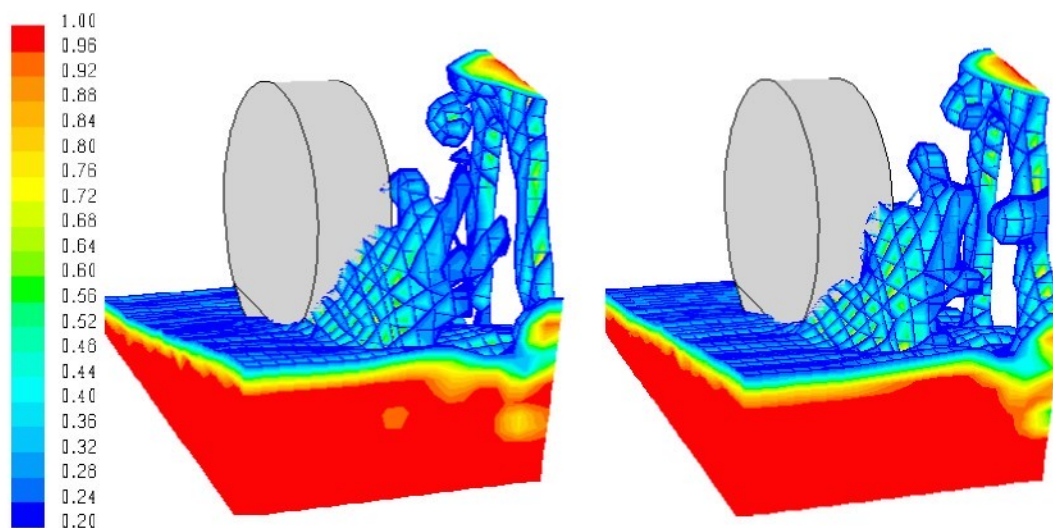
4.3.2 Podélný náklon -11°

Další variantou převodové skříně je náklon -11°. Příložené obrázky dokumentují časový vývoj až do ustáleného stavu v čase $t = 5$ s (obr.4.6a až obr.4.6d).



Obr. 4.6a – stav v čase $t = 0,4$ s

Obr. 4.6b – stav v čase $t = 1$ s



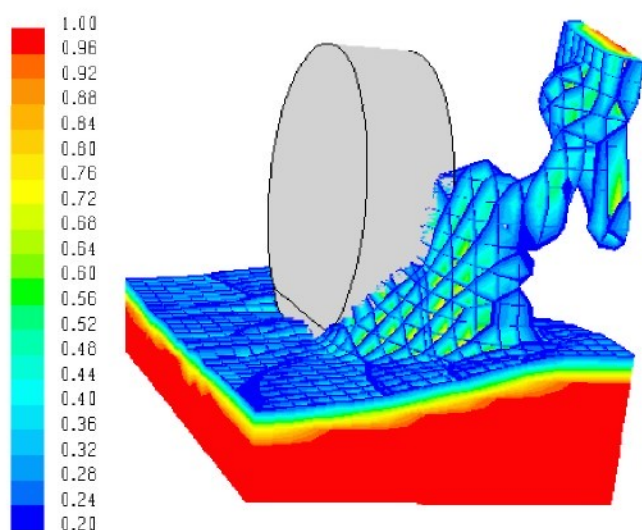
Obr. 4.6c – stav v čase $t = 2$ s

Obr. 4.6d – stav v čase $t = 5$ s

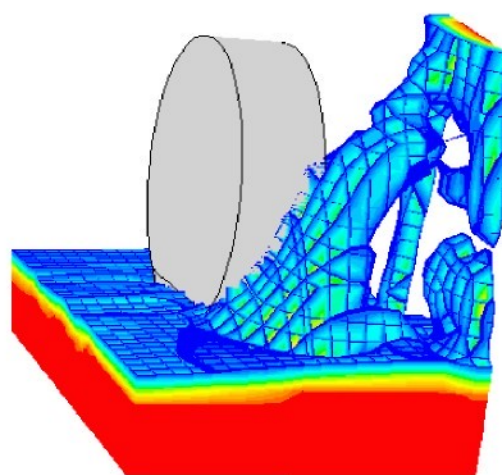
Vlivem tohoto náklonu se dostane větší objem oleje do místa náběru kolem, což má stejný efekt, jako by se celkově zvedla hladina oleje. Rozstřík probíhá s vyšší intenzitou při větším objemu rozstříknutého oleje a též dochází ke změně směru proudu oleje blíže k přední stěně převodové skříně.

4.3.3 Příčný náklon +6°

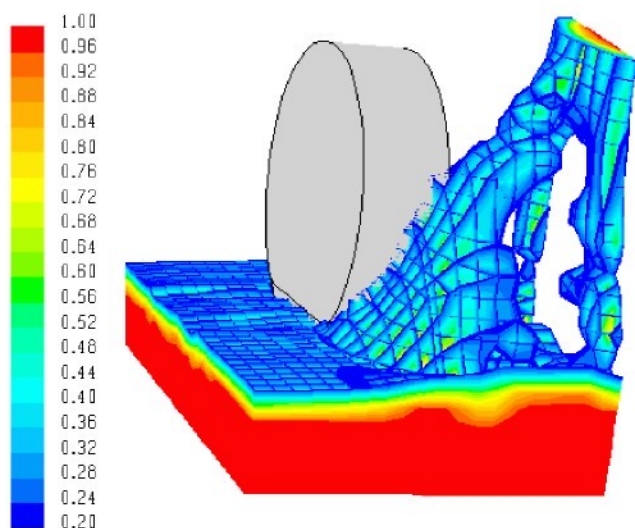
První variantou příčného náklonu je hladina o sklonu +6°. Tento případ odpovídá simulaci zatáčení dopravního prostředku, jehož je převodová skříň součástí. Následuje průběh vývoje proudění (obr.4.7a až obr.4.7d).



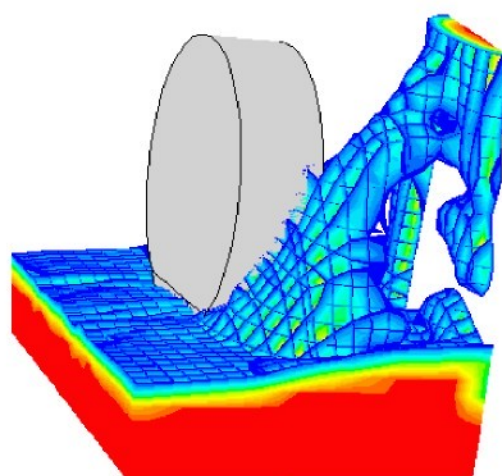
Obr. 4.7a – stav v čase $t = 0,4 \text{ s}$



Obr. 4.7b – stav v čase $t = 1 \text{ s}$



Obr. 4.7c – stav v čase $t = 2 \text{ s}$

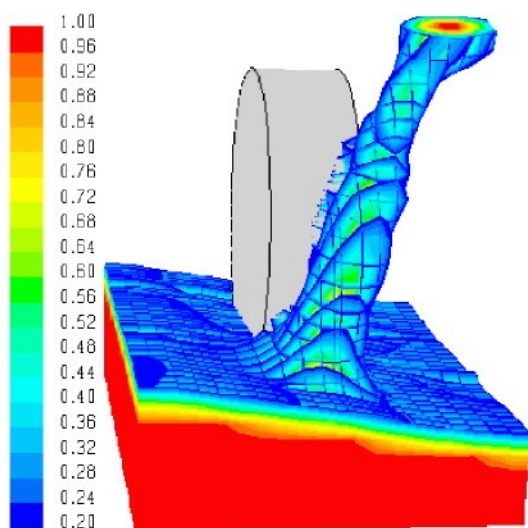


Obr. 4.7d – stav v čase $t = 5 \text{ s}$

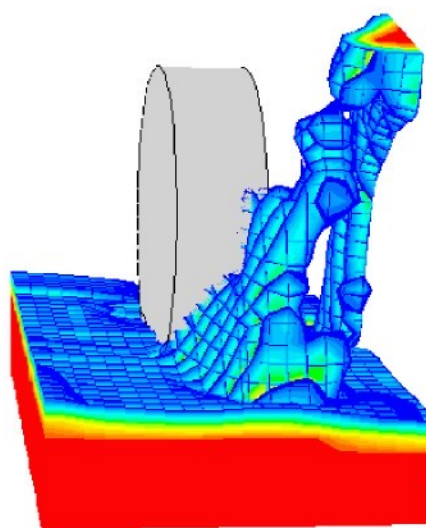
Z uvedených obrázků vyplývá, že od času $t = 1 \text{ s}$ je tok oleje plynulý a dochází k ustálení hladiny oleje v neměnné poloze. Vlivem náklonu je proud oleje směřován převážně na zadní stěnu převodové skříně, částečně na horní zadní roh skříně.

4.3.4 Příčný náklon -6°

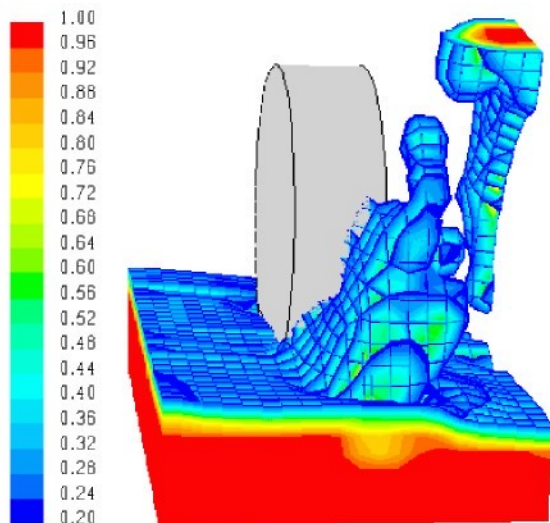
Následuje simulace točivého pohybu dopravního prostředku na opačnou stranu. Přiložené obrázky opět dokumentují vývoj proudění do ustáleného stavu (obr.4.8a až obr.4.8d).



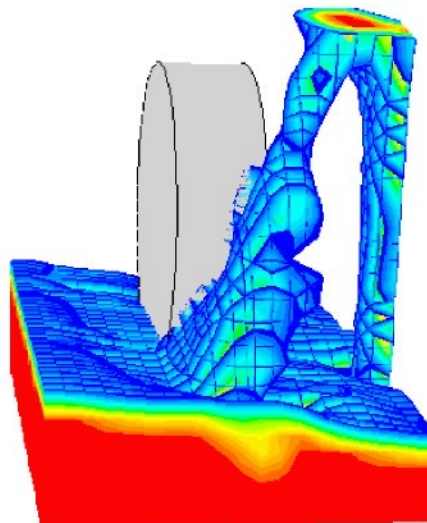
Obr. 4.8a – stav v čase $t = 0,4$ s



Obr. 4.8b – stav v čase $t = 1$ s



Obr. 4.8c – stav v čase $t = 2$ s

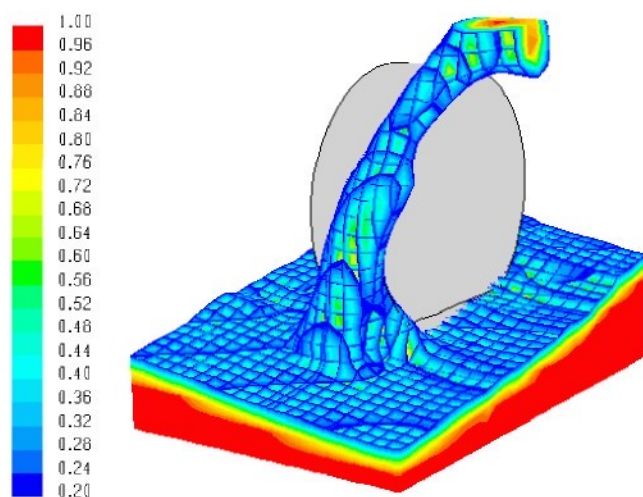


Obr. 4.8d – stav v čase $t = 5$ s

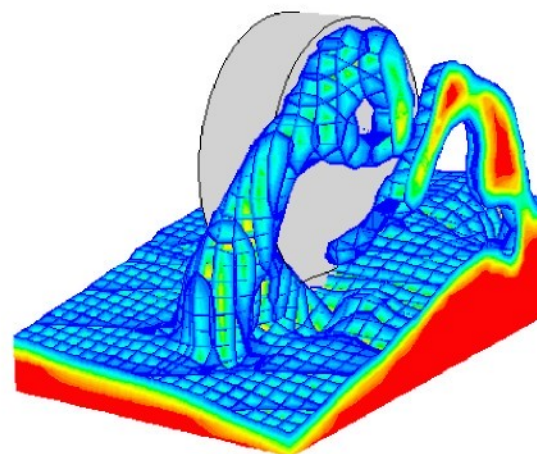
Z obrázků je patrné, že při výkmitu hladiny dochází k přerušovanému rozstříku oleje v průběhu vývoje do ustáleného stavu (obr.4.8c). Oproti náklonu opačnému (+6°) je v tomto případě hlavní proud oleje směřován do stropu převodové skříně a následně stéká po zadní stěně zpět do olejové lázně.

4.3.5 Kombinovaný náklon $+11^\circ+6^\circ$

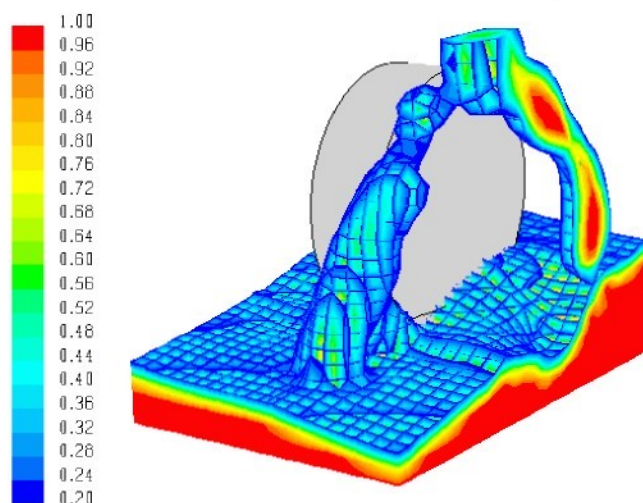
Kombinovaný náklon představuje zahrnutí několika vlivů na chování oleje v převodové skříni. Obr.4.9a až obr.4.9d ukazují vývoj proudění oleje do ustáleného stavu.



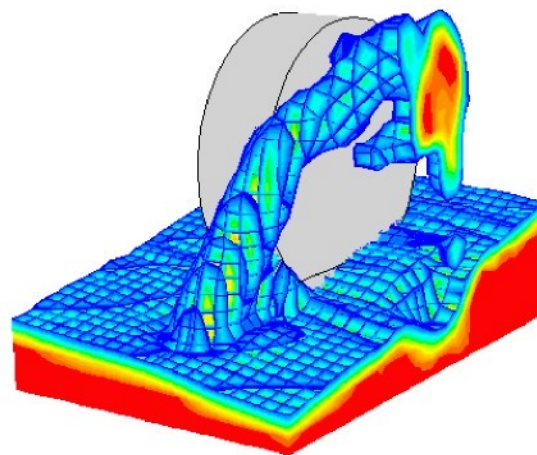
Obr. 4.9a – stav v čase $t = 0,4 \text{ s}$



Obr. 4.9b – stav v čase $t = 1 \text{ s}$



Obr. 4.9c – stav v čase $t = 2 \text{ s}$

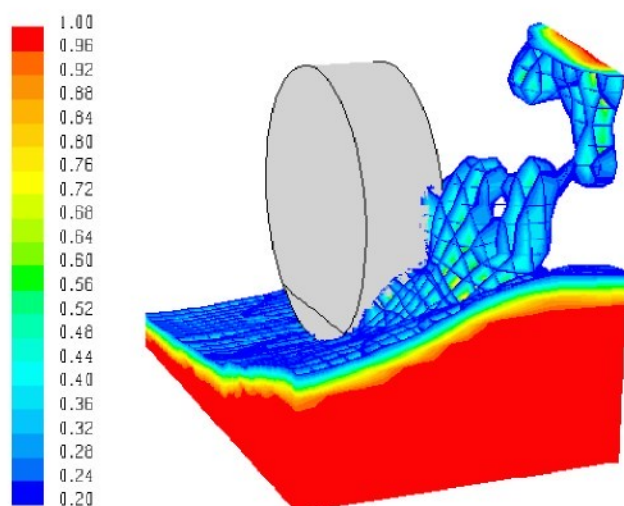


Obr. 4.9d – stav v čase $t = 5 \text{ s}$

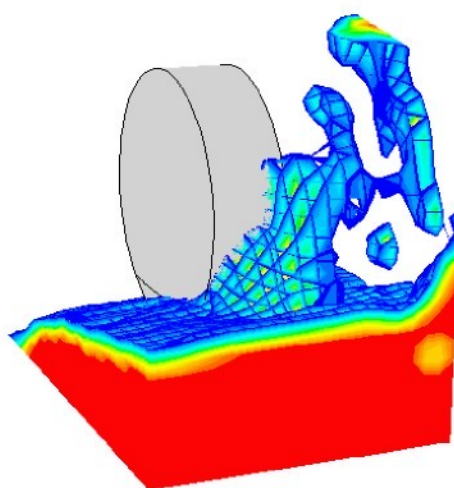
Z vývoje proudění je patrné, že se jedná o variantu nepříznivou, protože v místě náběru je množství oleje sníženo, a odpovídá to tak menšímu množství oleje v převodové skříni. Proud oleje směřuje převážně do boční stěny a téměř nepříjde do styku se stropem skříně.

4.3.6 Kombinovaný náklon -11° - 6°

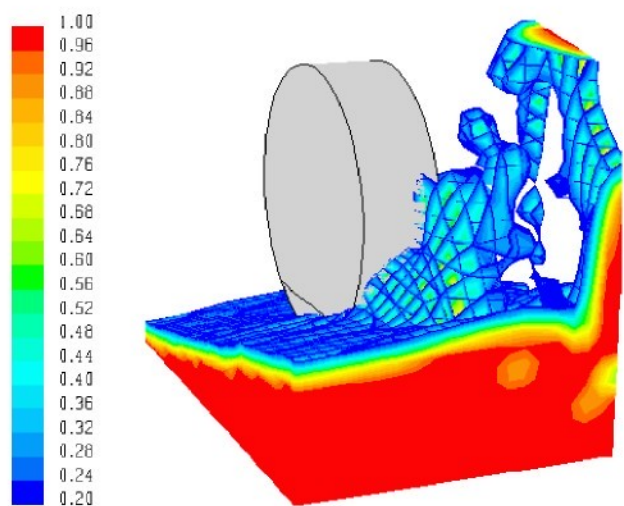
Pohyb převodové skříně způsobuje náklon hladiny oleje -11° - 6° . Na přiložených obrázcích je zdokumentován časový vývoj proudění (obr.4.10a až obr.4.10d).



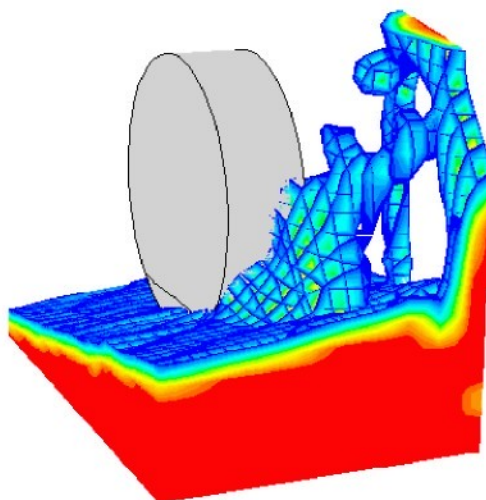
Obr. 4.10a – stav v čase $t = 0,4$ s



Obr. 4.10b – stav v čase $t = 1$ s



Obr. 4.10c – stav v čase $t = 2$ s

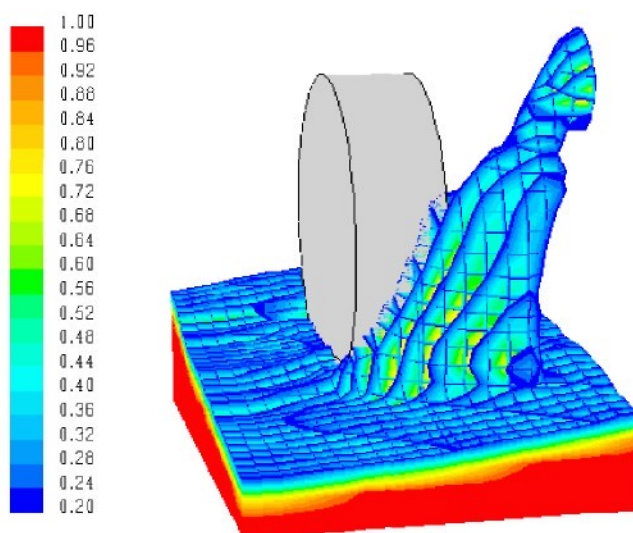


Obr. 4.10d – stav v čase $t = 5$ s

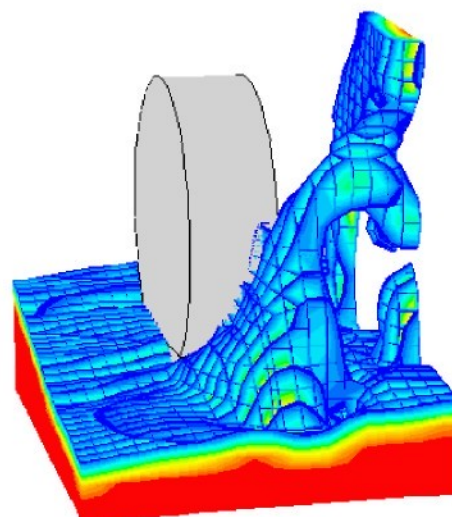
Jedná se o poměrně příznivý případ, kdy vlivem nahromaděného oleje před kolem dochází k intenzivnějšímu rozstříku oleje po převodové skříně. Zpočátku má sice zvlnění hladiny za následek přerušovaný proud oleje, s ustálením proudění se ale tento jev ztrácí a olej přechází do plynulého proudu (detailnější pohled v příloze č.1).

4.3.7 Kombinovaný náklon $+11^{\circ}-6^{\circ}$

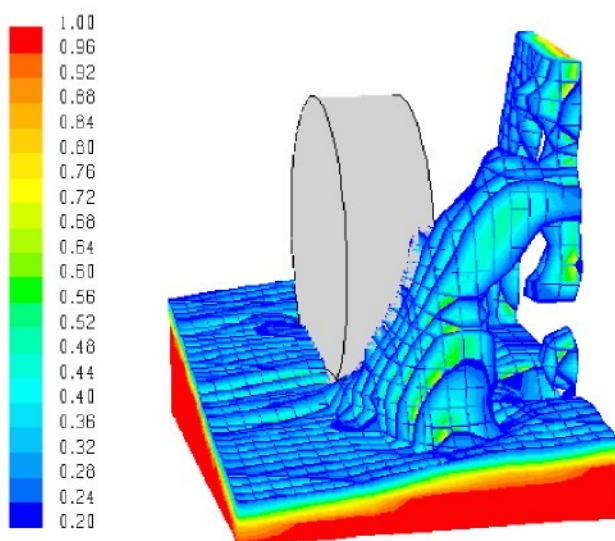
Následující obrázky ukazují vývoj proudění oleje v převodové skříně pro polohu hladiny $+11^{\circ}-6^{\circ}$. Hodnoty gravitačních zrychlení pro tuto úlohu jsou v tab.2, kapitola 3.4.



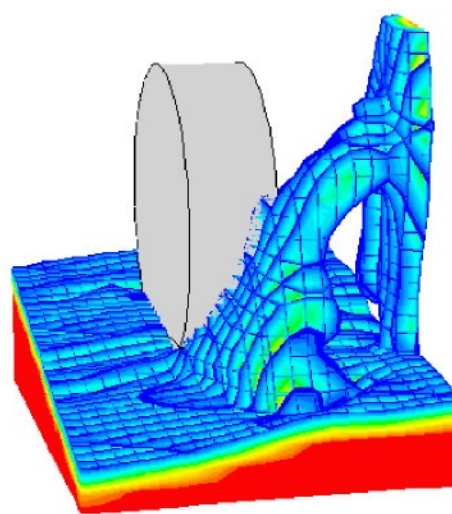
Obr. 4.11a – stav v čase $t = 0,4 \text{ s}$



Obr. 4.11b – stav v čase $t = 1 \text{ s}$



Obr. 4.11c – stav v čase $t = 2 \text{ s}$

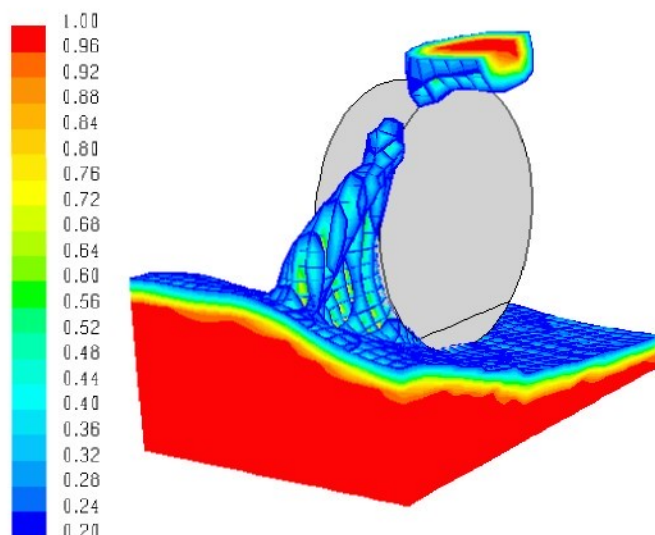


Obr. 4.11d – stav v čase $t = 5 \text{ s}$

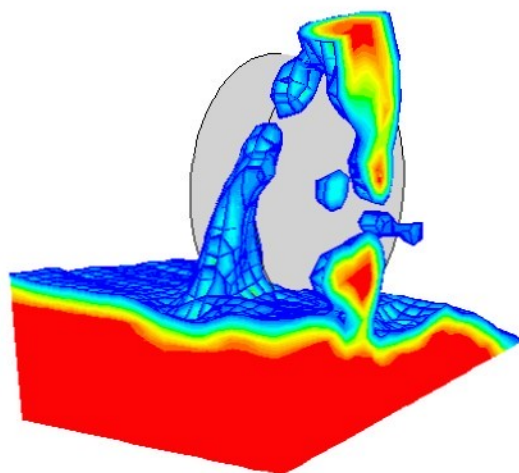
Z předešlého vývoje proudění (obr.4.11a až 4.11d) je patrné, že proud oleje je směřován na zadní stěnu převodové skříně, kde následně stéká zpět do olejové lázně. Rozstřík též není konstantní, vlivem pohybu hladiny dochází ke změně místa na stěně, kam proud oleje dopadá.

4.3.8 Kombinovaný náklon $-11^{\circ}+6^{\circ}$

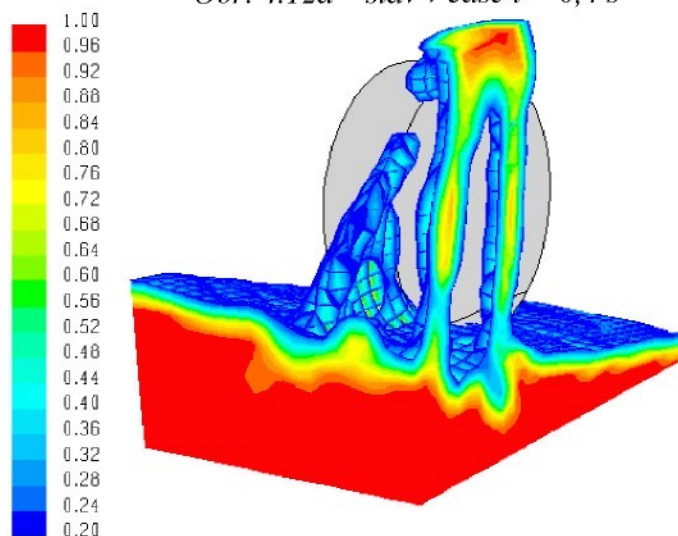
Posledním náklonem pro osamocené ozubené kolo je $-11^{\circ}+6^{\circ}$. Uvedené obrázky dokumentují vývoj proudění do času $t = 5\text{ s}$ (obr.4.12a až obr.4.12d).



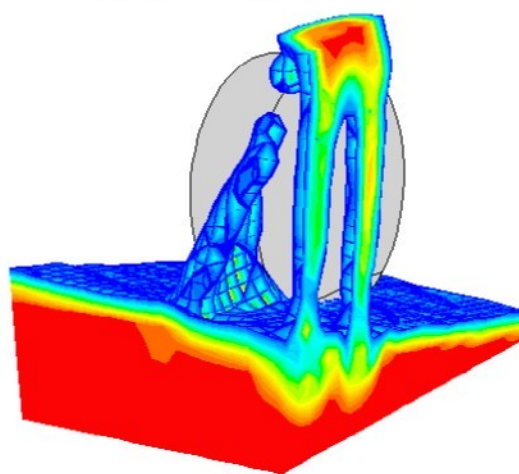
Obr. 4.12a – stav v čase $t = 0,4\text{ s}$



Obr. 4.12b – stav v čase $t = 1\text{ s}$



Obr. 4.12c – stav v čase $t = 2\text{ s}$



Obr. 4.12d – stav v čase $t = 5\text{ s}$

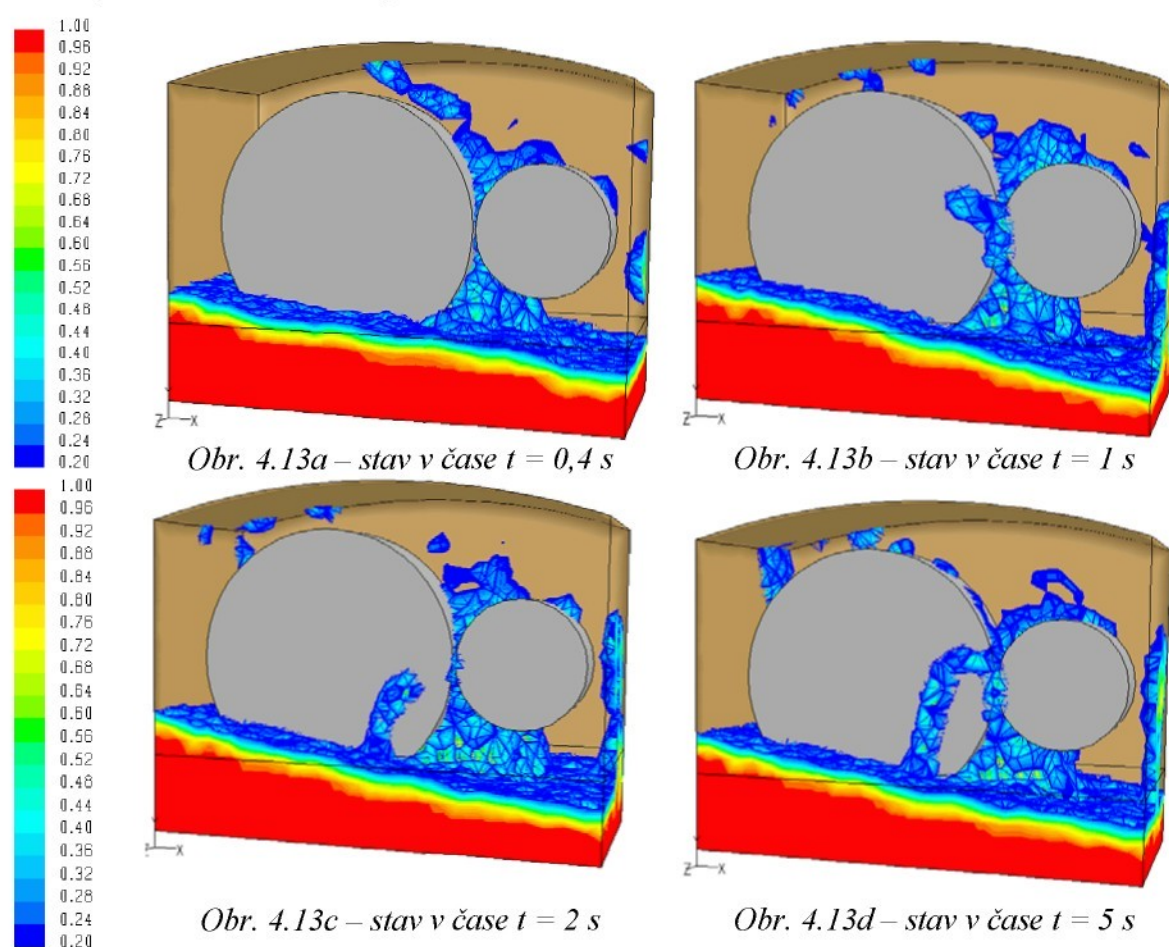
Na počátku řešení můžeme sledovat značné rozkolísání hladiny, které má vliv na množství nabíraného oleje a plynulost jeho odstříku. Proud oleje směřuje přímo do hrany převodové skříně, odkud pak stéká zpět do olejové lázně.

4.4 Náklony převodové skříně – soukolí ozubených kol

V případě soukolí ozubených kol byly realizovány stejné náklony hladiny olejové lázně jako v případě osamoceného kola.

4.4.1 Podélný náklon $+11^\circ$

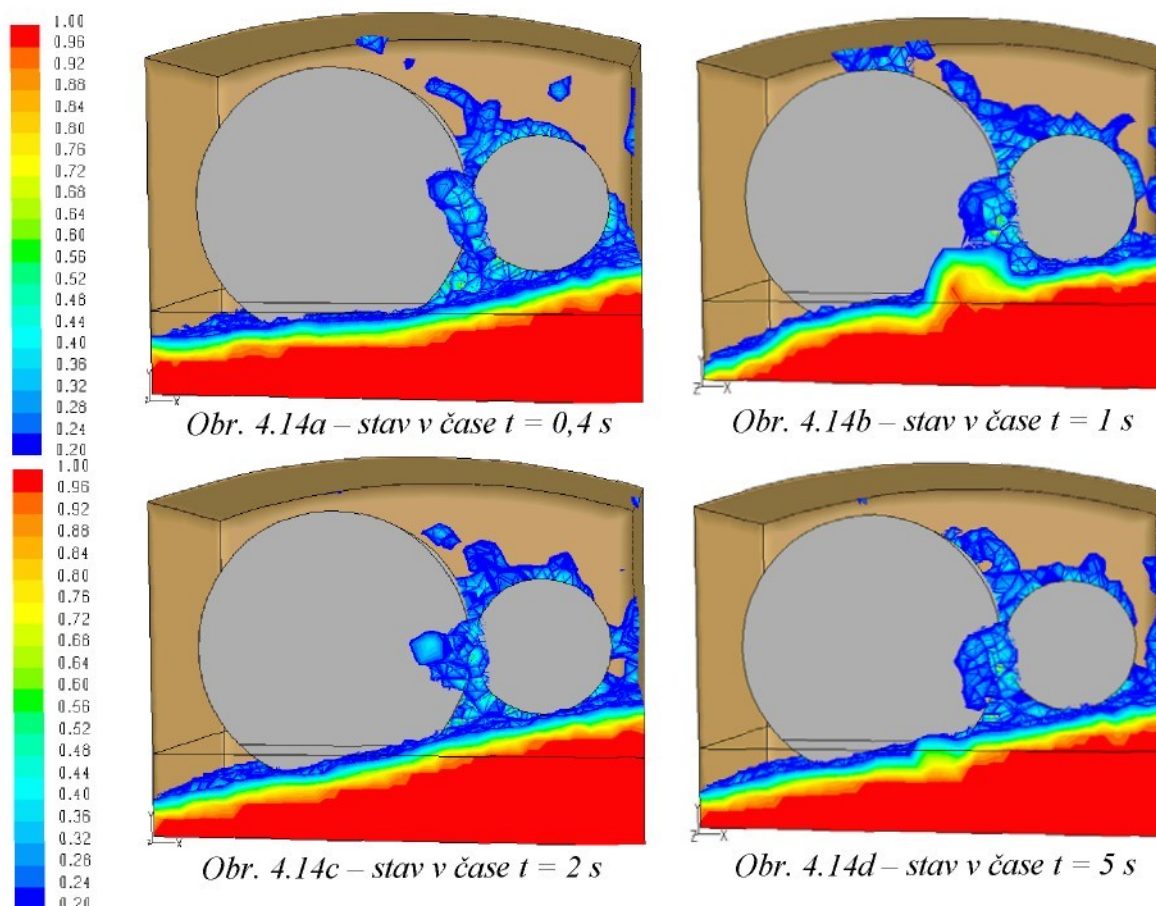
Jako první pohyb převodové skříně byl opět zvolen podélný náklon $+11^\circ$. Na následujících obrázcích je zachycen vývoj proudění v převodové skříně od času $t = 0,4 \text{ s}$ do ustáleného stavu (obr.4.13a až obr.4.13d).



Z obrázků je patrné, že vytlačení oleje v místě záběru má významný vliv na proudění uvnitř skříně. V porovnání s modelem osamoceného kola je množství oleje rozstříknutého v převodové skříně znatelně menší. Část oleje vytlačенého v místě záběru stéká zpět do lázně, významné množství je také odstříkováno směrem k bočním stěnám skříně. Při počátečním výkmitu hladiny je kolem nabíráno menší množství oleje, a tím klesá i jeho tok po převodové skříně.

4.4.2 Podélný náklon -11°

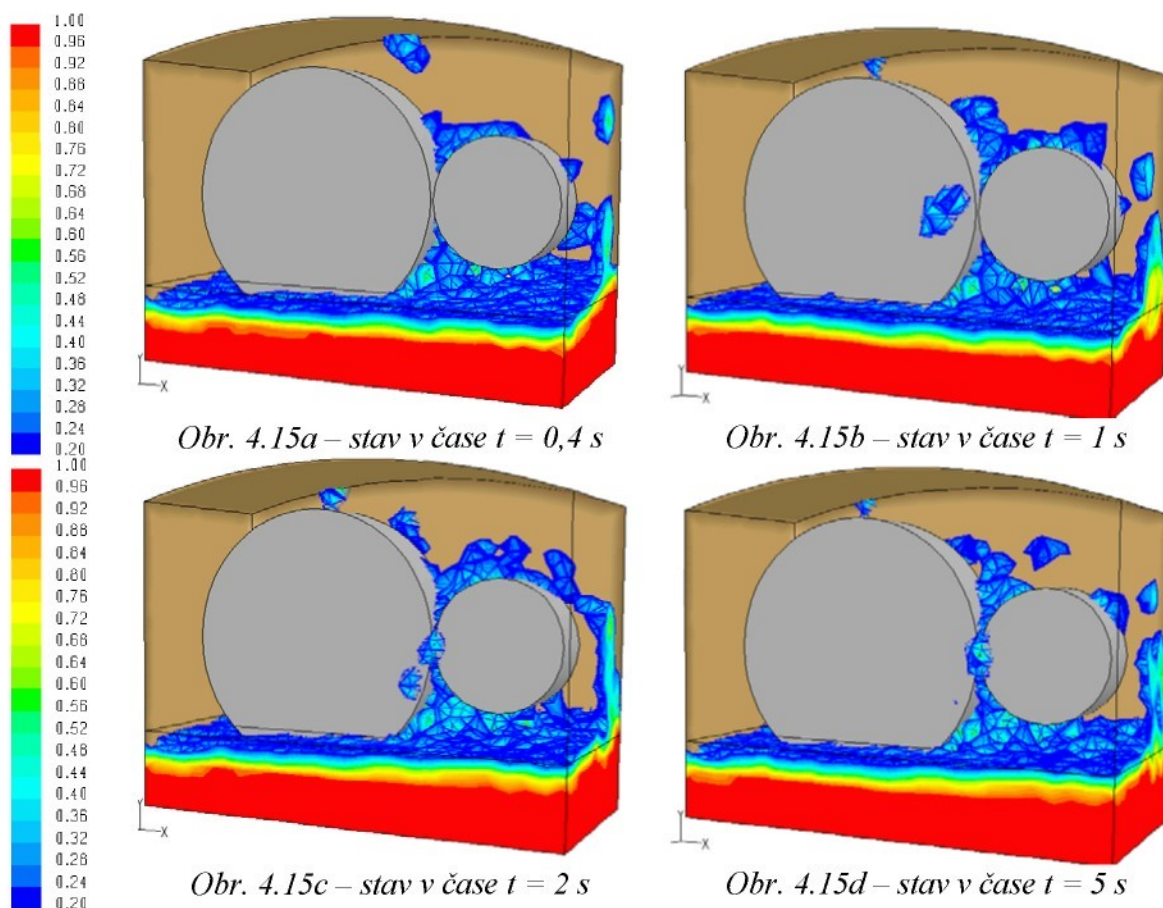
Následuje podélný náklon opačný, tedy -11°. Přiložené obrázky dokumentují vývoj od času $t = 0,4$ s do ustáleného stavu (obr.4.14a až obr.4.14d).



Na počátku proudění v čase $t = 1$ s dochází v převodové skříní ke zvlnění oleje, které má za následek částečné ponoření menšího z kol do lázně. Tento jev zůstává i po ustálení hladiny oleje, i když ne v takové míře. V důsledku tohoto stavu se i menší kolo brodí v olejové lázni, a tím se zvyšuje množství nabíraného oleje. Velká část oleje je rozstříkována ve směru šikmého ozubení, naráží na zadní stěnu a stéká zpět do olejové lázně (lépe viditelné v příloze č.2).

4.4.3 Příčný náklon +6°

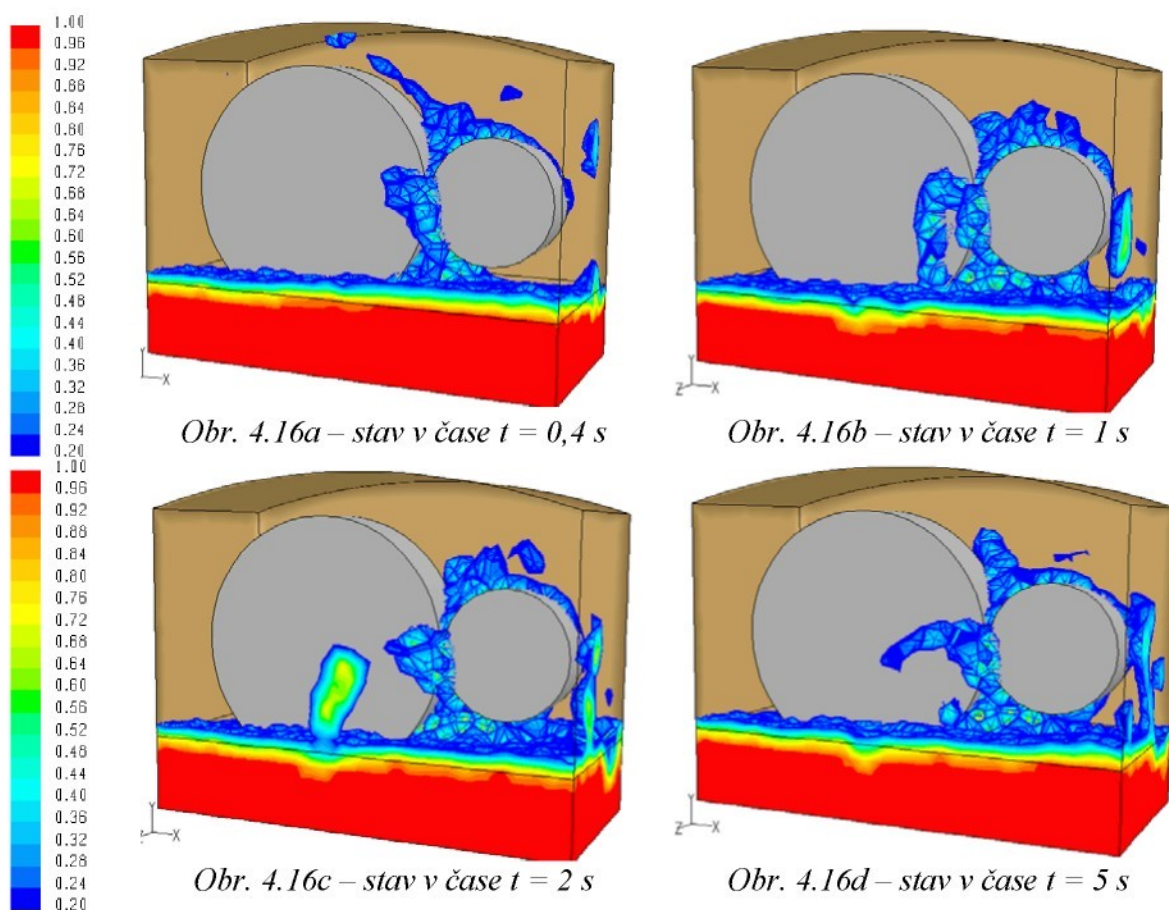
První variantou příčného náklonu soukolí je případ +6°. Na uvedených obrázcích (obr.4.15a až 4.15d) je zobrazen vývoj od počátečního času $t = 0,4$ s do ustáleného stavu proudění. Počáteční stav převodové skříně je zobrazen v kapitole 2.4.



Příčný náklon má za následek přesun části oleje za ozubená kola, jak je patrné z přiložených obrázků. Při rozběhu ozubených kol dojde ke zvlnění hladiny oleje, která se tímto dočasně pod menším kolem zvýší. S postupem času se tento jev ustaluje – zcela ovšem nevymizí. Část oleje opět proudí do prostoru za koly (lépe viditelné v příloze č.3), nebo je rozstříkována menším kolem na boční stěnu převodové skříně, odkud stéká zpět do lázně.

4.4.4 Příčný náklon -6°

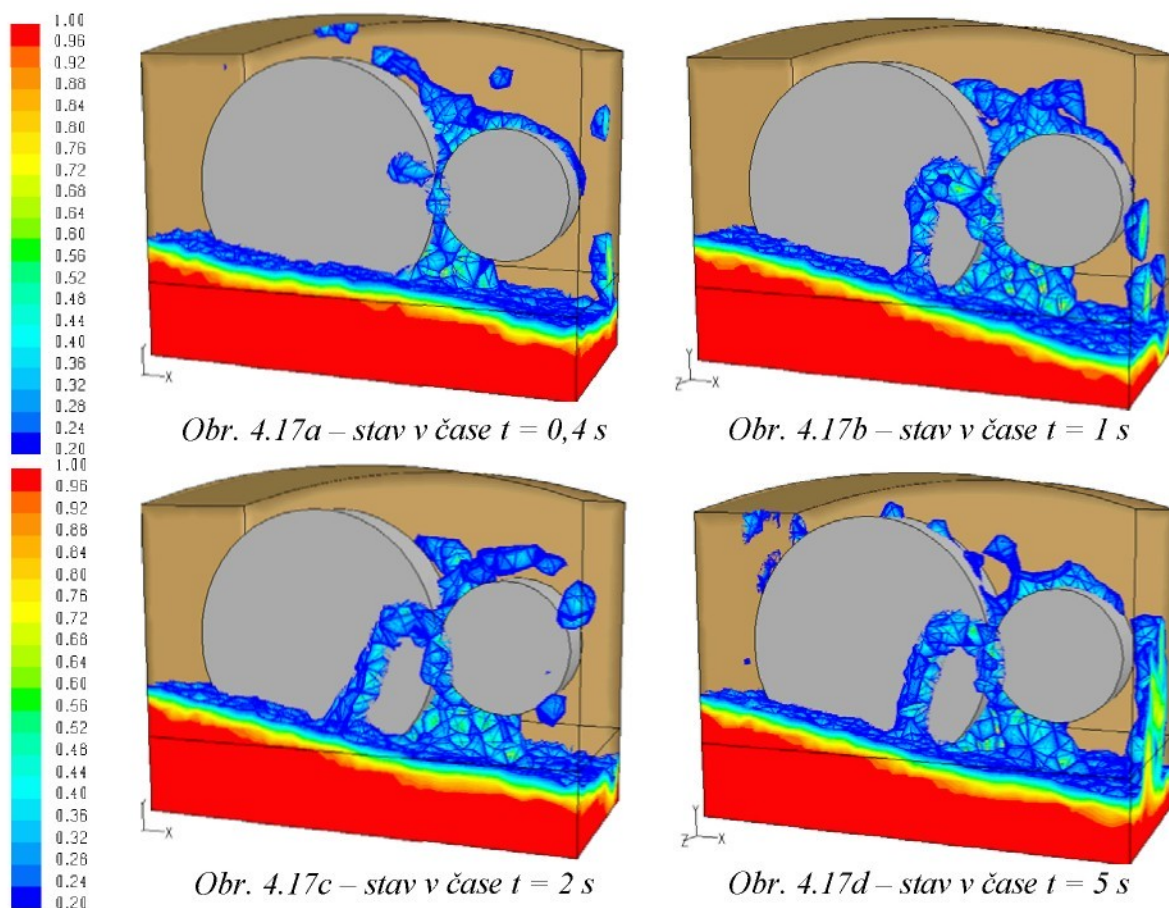
Následuje případ příčného náklonu -6° . Příložené obrázky dokumentují vývoj od stavu počátečního ($t = 0,4$ s) do ustáleného stavu proudění v čase $t = 5$ s (obr.4.16a až obr.4.16d). Klidový stav je zobrazen v kapitole 2.4.



Jak je patrné z příložených obrázků, zvýší se náklonem hladina oleje před ozubeným kolem. Tento jev je znatelný hlavně v počáteční fázi proudění. Rozkmit hladiny vlivem pohybu ozubeného kola není tak znatelný, jako v případě opačného náklonu $+6^\circ$. Rozstříknutý proud oleje zasahuje boční a částečně přední stěnu převodové skříně, odkud stéká zpět do lázně.

4.4.5 Kombinovaný náklon $+11^\circ+6^\circ$

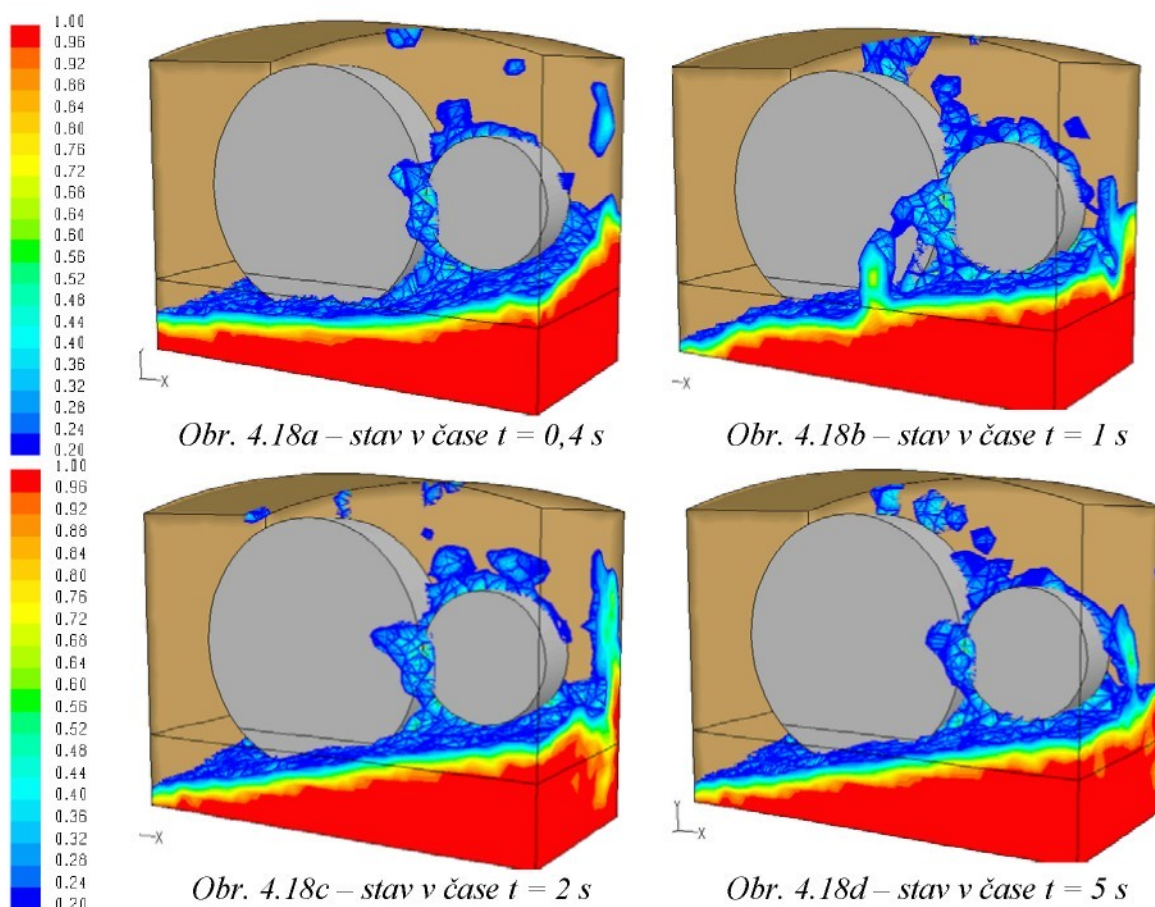
Prvním řešeným kombinovaným náklonem je případ $+11^\circ+6^\circ$. Můžeme říci, že se jedná o zatáčení dopravního prostředku, jehož je převodová skříň součástí, v kombinaci se zpomalením či náklonem vozovky. Obr.4.17a až 4.17d představují časový vývoj od počátku do ustáleného stavu proudění.



Jak je patrné z přiložených obrázků, dojde vlivem náklonu ke snížení hladiny oleje pod místem záběru. Tento jev nemá výrazný vliv na množství nabíraného oleje, ale směr rozstříku se mění. Proud oleje nedosáhne přední stěny převodové skříně a vytlačen z místa záběru proudí přímo zpět do lázně. Část oleje je unášena brodicím se kolem přes zúžené místo a dosahuje stropu převodové skříně.

4.4.6 Kombinovaný náklon -11° - 6°

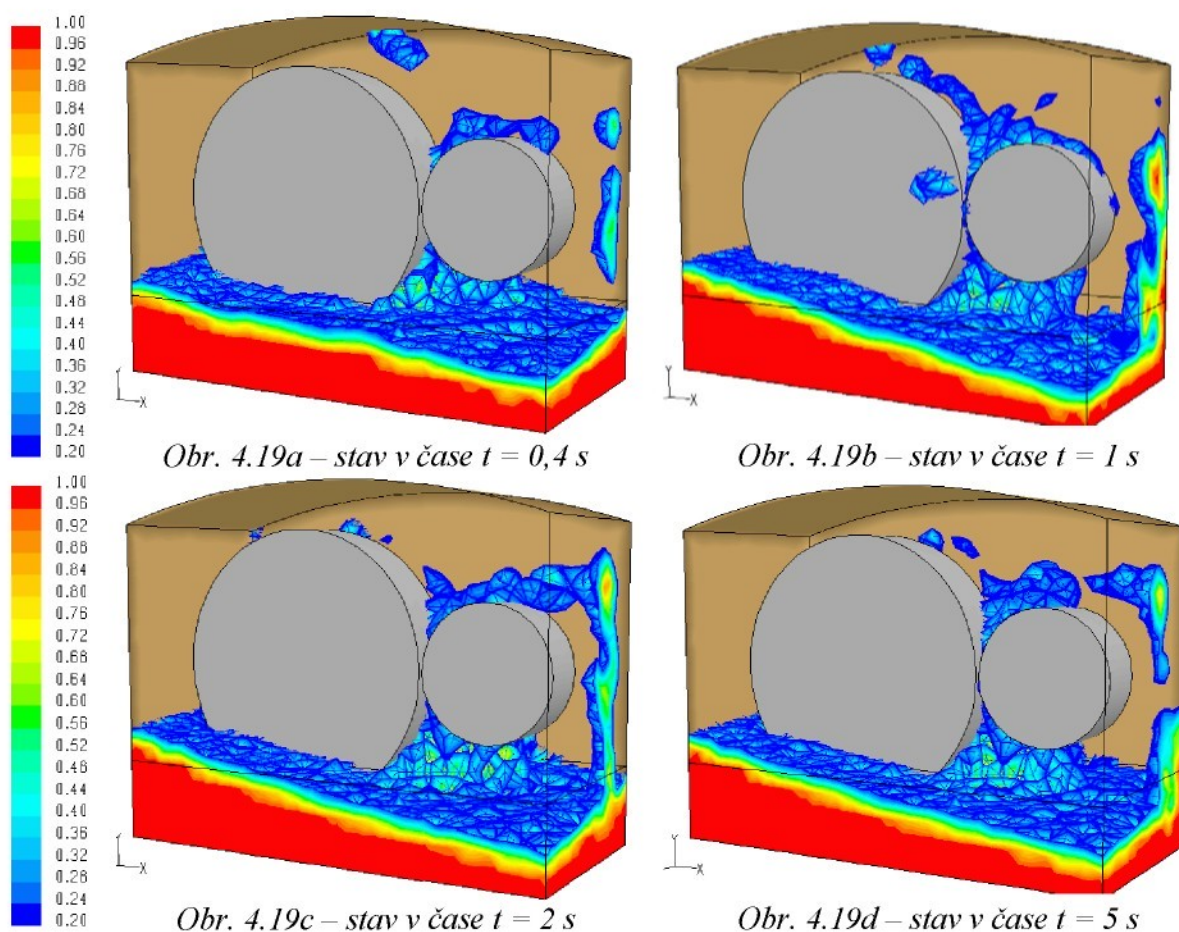
Dalším řešeným kombinovaným náklonem je varianta -11° - 6° . V praxi by takový případ odpovídal zatáčení dopravního prostředku spolu se zrychlením či rozjezdem. Následující obrázky představují vývoj proudění v závislosti na čase, od rozeběhu do ustáleného stavu proudění (obr.4.18a až 4.18d).



Počáteční zvlnění hladiny má při rozeběhu takovou intenzitu, že v levém dolním rohu nezůstane prakticky žádné množství oleje. V čase $t = 5 \text{ s}$ pak dojde k ustálení hladiny. Na druhé straně se vlivem náklonu spoluzabírající kolo částečně brodí v oleji, a tím je zintenzivněn tok oleje ve skříní. Část oleje proudí v průběhu rozběhu na přední stěnu, po ustálení pak převážně na stěnu zadní (lépe patrné v příloze č.4). Proud oleje, který dosáhne stropu převodové skříně, nemá plynulý charakter.

4.4.7 Kombinovaný náklon $+11^{\circ}-6^{\circ}$

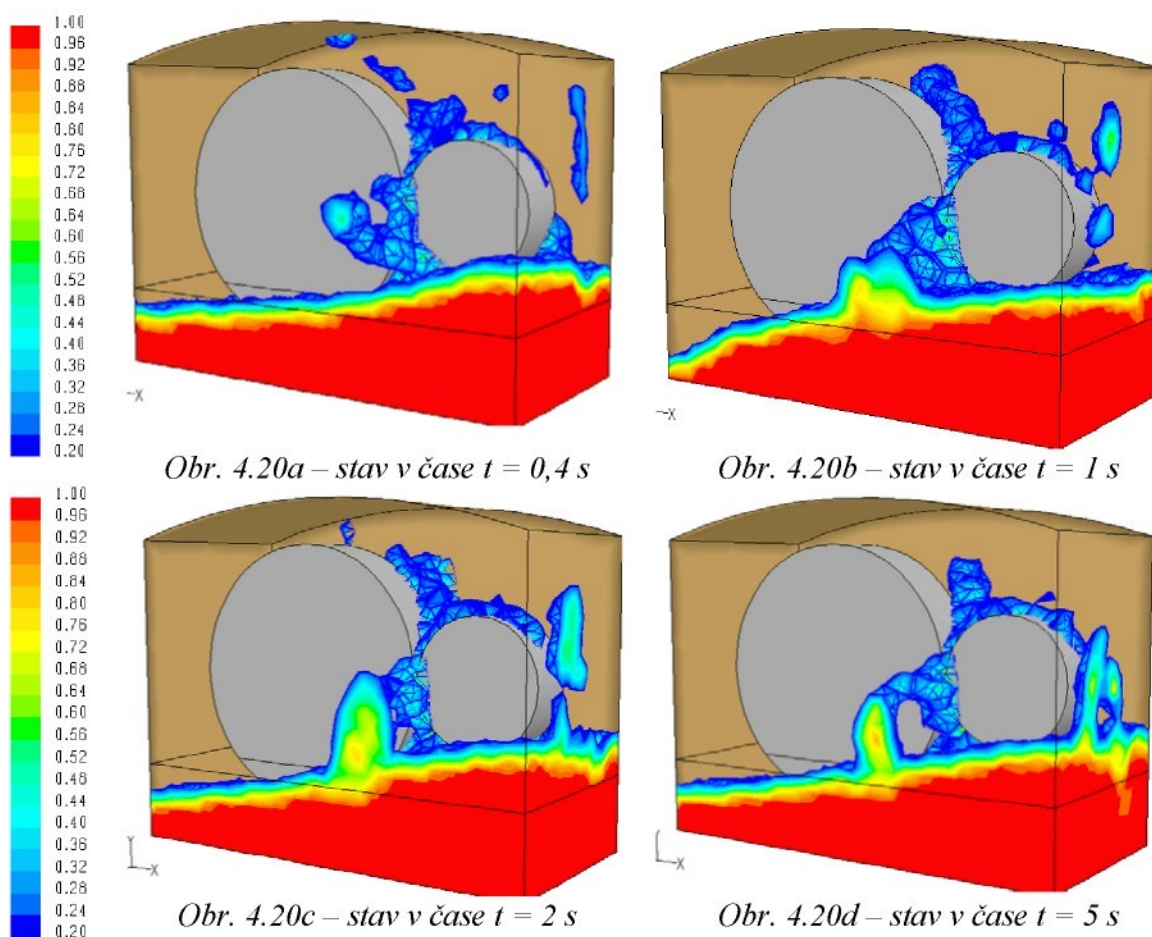
Předposledním sledovaným provozním stavem je kombinovaný náklon $+11^{\circ}-6^{\circ}$. Jedná se opět o provozní kombinaci zatačení a brždění dopravního prostředku, jehož je převodová skříň součástí. Uvedené obrázky dokumentují časový vývoj proudění od stavu těsně po rozeběhu, v čase $t = 0,4$ s (obr.4.19a), až do ustáleného stavu proudění v čase $t = 5$ s (obr.4.19d).



Při této variantě kombinovaného náklonu je nejvyšší hladina oleje za kolem, které se brodí v lázni. Silně je ovlivněno množství rozstříknutého oleje, jehož největší část naráží do boční stěny převodové skříně a následně stéká do olejové lázně. V porovnání s předcházejícími případy dosáhne stropu skříně pouze malé množství oleje.

4.4.8 Kombinovaný náklon $-11^{\circ}+6^{\circ}$

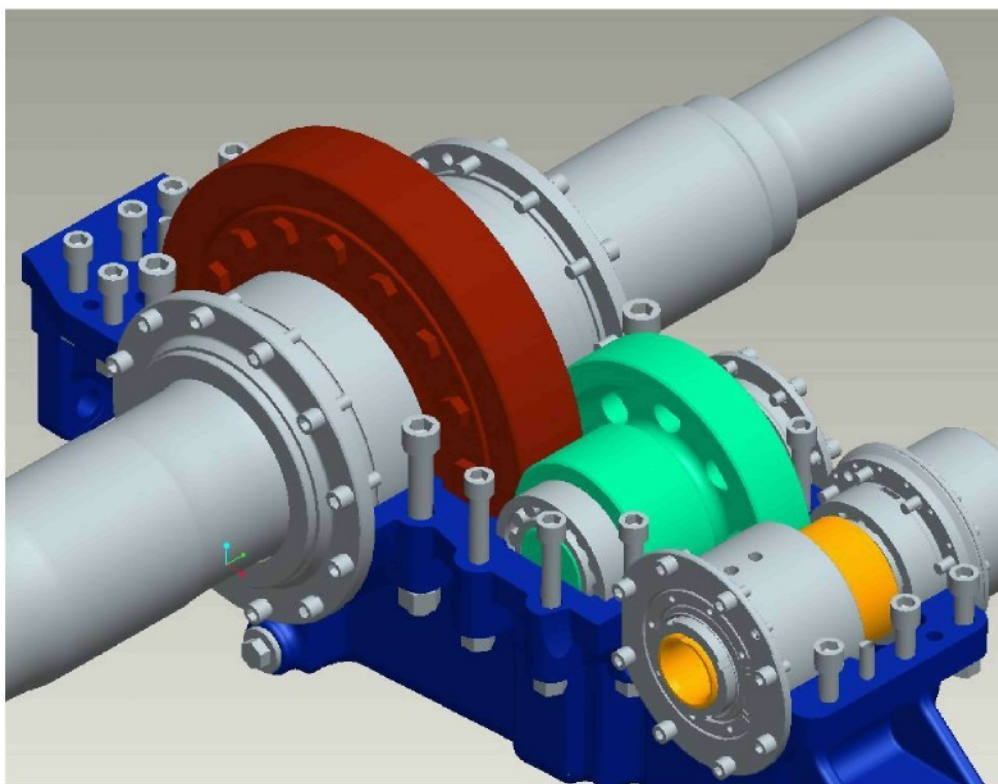
Závěrečnou variantou náklonu soukolí ozubených kol je kombinovaný náklon $-11^{\circ}+6^{\circ}$. Jedná se o zatačení dopravního prostředku doplněné o zrychlení či náklon vozovky. Představené obrázky dokumentují vývoj od okamžiku těsně po rozeběhu v čase $t = 0,4$ s (obr.4.20a) až po ustálený stav proudění v čase $t = 5$ s (obr.4.20d).



Vlivem náklonu se hladina oleje znatelně zvedá v oblasti pod malým kolem, což má za následek, že se i toto kolo částečně brodí v olejové lázni. Brodění obou kol navyšuje množství oleje rozstříknutého v převodové skříní. Příčný náklon pak způsobuje boční odstřík oleje z místa záběru. Tento olej naráží na částečně na přední a také na boční stěnu skříně, odkud pak stéká zpět do olejové lázně.

4.5 Kompletní převodová skříň

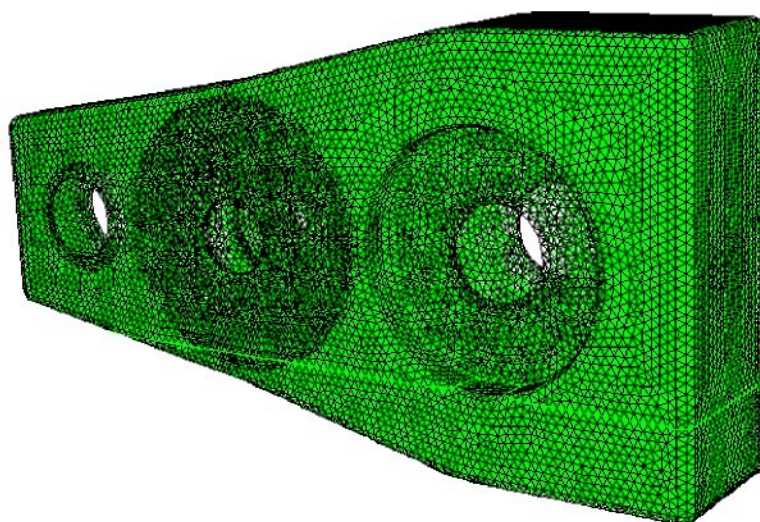
Nejsložitějším modelem použitým v práci je model kompletní převodové skříně. Je složen z 5 ozubených kol, ve skříně se nachází celkem 3 hřídele – vstupní, předlohový a výstupní. Rozměrově odpovídá reálné převodové skříně užívané v tramvajích po celé ČR. Výkres z programu Pro Engineer je uveden na obr.4.21.



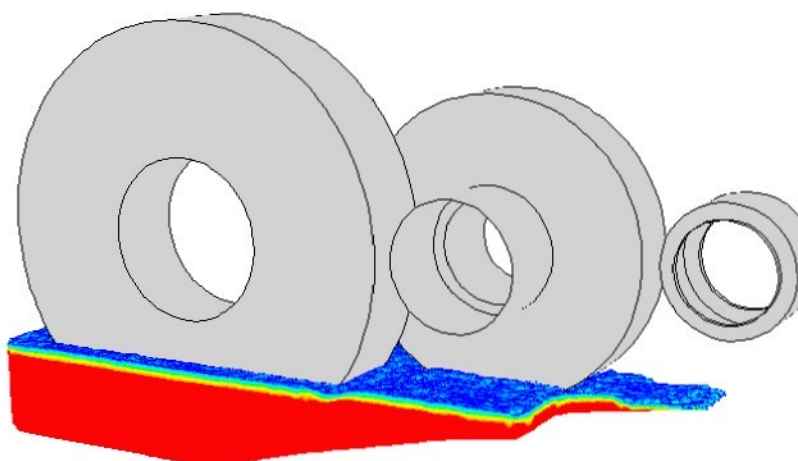
Obr.4.21 – model převodové skříně v programu Pro Engineer

4.5.1 3D model sítě a počáteční stav

Pro přehlednost je na obr.4.22 zobrazen model převodové skříně a následně na obr.4.23 rozložení fází v počátečním stavu proudění. Oproti předchozím zjednodušujícím modelům jsou zde v olejové lázni umístěna dvě kola, jež mají rozstříkem zajišťovat mazání a odvod tepla v místě záběru současně s mazáním valivých ložisek.



Obr.4.22 – model převodové skříně s povrchovým zobrazením sítě

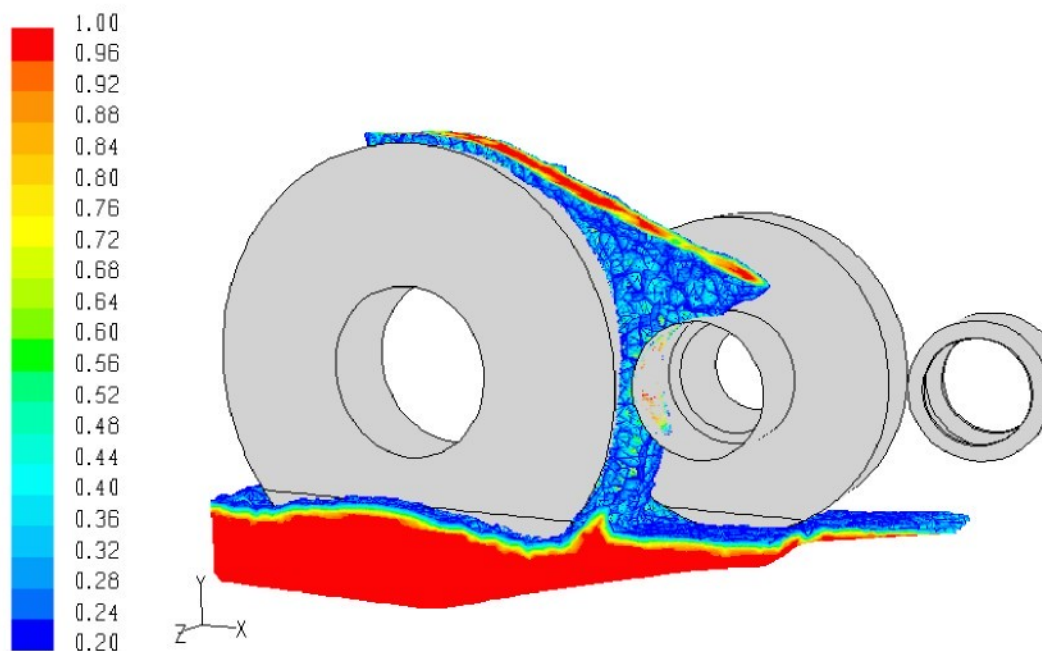


Obr.4.23 – počáteční stav proudění

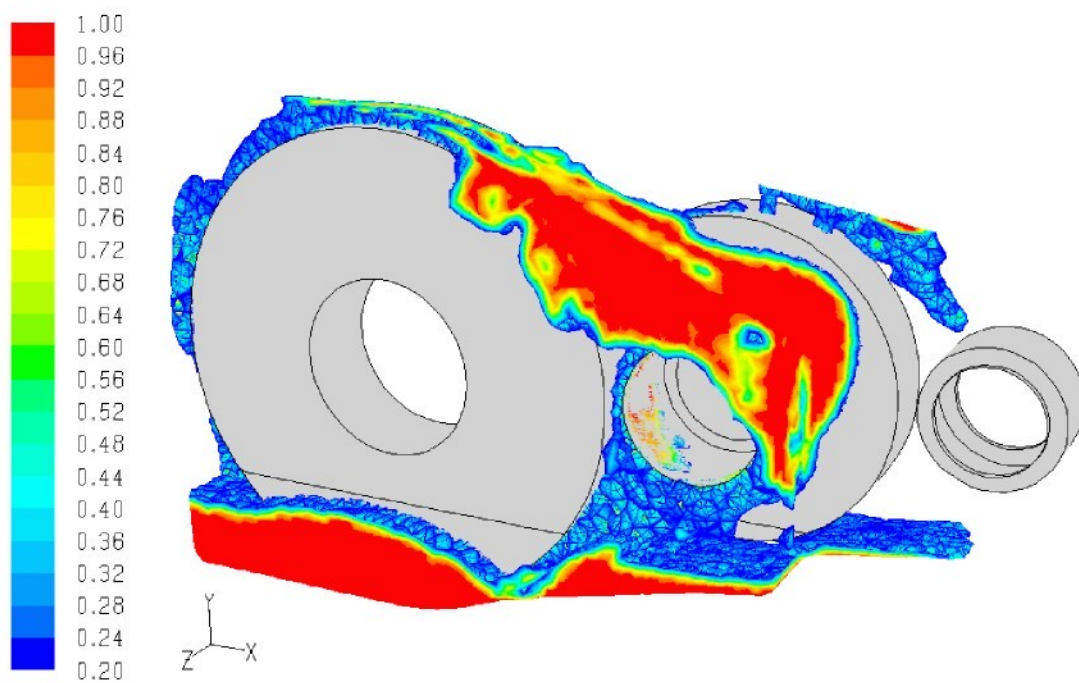
4.5.2 Časový vývoj proudění

V důsledku vysokých nároků na výpočetní čas a složitost řešené úlohy (interakce modelovaných drsností, omezený prostor pro tok oleje, množství pohybujících se členů, apod.) bylo dosaženo stavu proudění v časovém okamžiku $t = 1$ s.

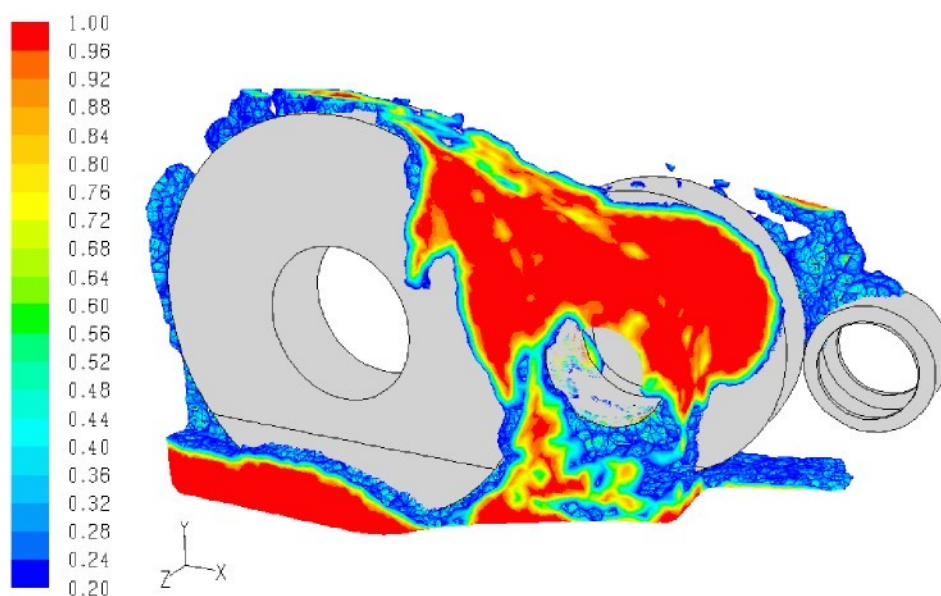
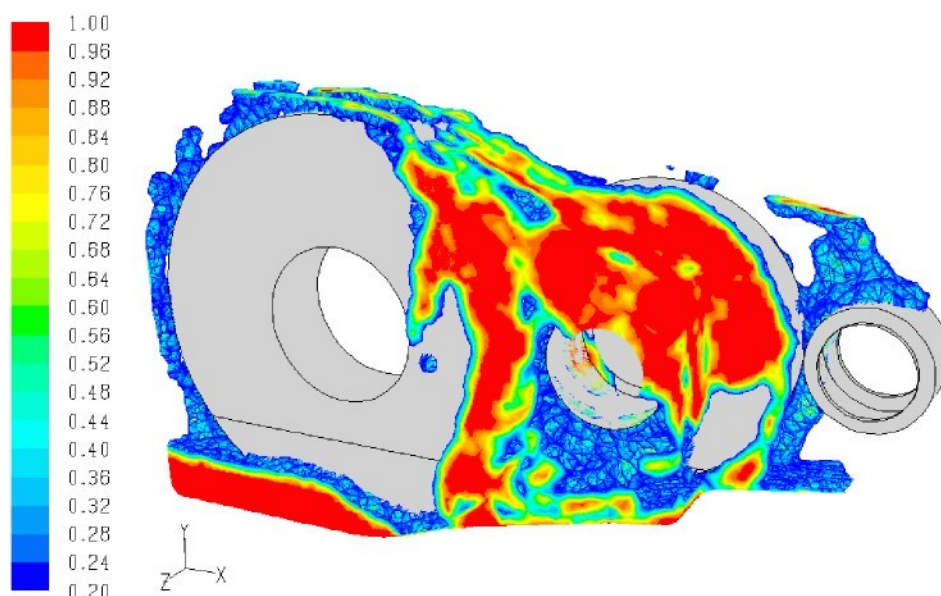
Na uvedených obrázcích je zobrazen časový vývoj proudění od stavu těsně po rozeběhu ozubených kol (obr.4.24a) až do konečného stavu výpočtu daného časem $t = 1$ s (obr.4.24).



Obr. 4.24a – vývoj proudění v čase $t = 0,1$ s



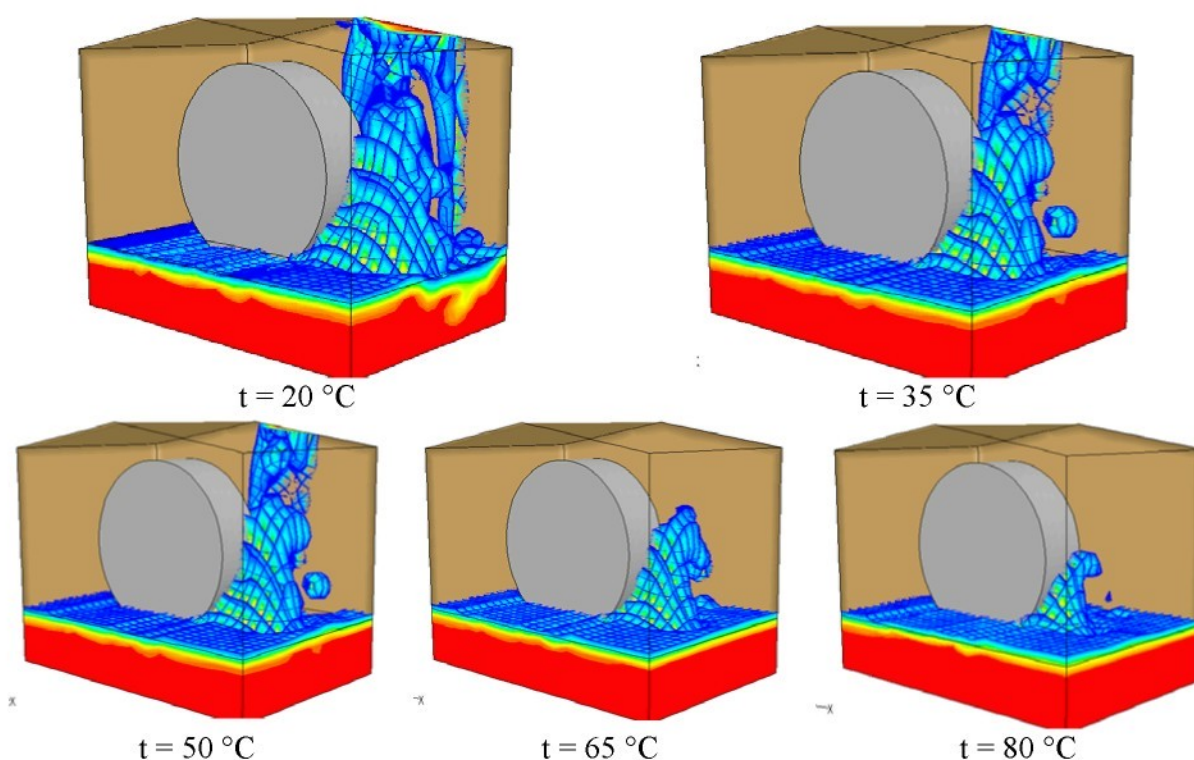
Obr. 4.24b – vývoj proudění v čase $t = 0,37$ s

Obr. 4.24c – vývoj proudění v čase $t = 0,65\text{ s}$ Obr. 4.24d – vývoj proudění v čase $t = 1\text{ s}$

Z uvedených obrázků vyplývá, že ozubené kolo nabírá velké množství oleje, a tím znatelně klesá hladina olejové lázně. Nabíraný olej je dále rozstříkáván přes spoluzabírající kola po převodové skříní. Zatímco u zkušebních modelů osamocené kola a soukolí byla skřín dostatečně veliká na pozorování jevů spojených s rozstříkem oleje, zde, v reálnějším případě, je místo, kam může olej proudit, značně omezené. V důsledku toho dochází, alespoň v počáteční fázi, k hromadění oleje nad pastorkem druhého převodového stupně. Olej pak dále stéká do olejové lázně.

4.6 Vliv viskozity

Jak již bylo řečeno, mechanické vlastnosti použitého oleje se velmi významně mění s teplotou. Největší pozorovatelný vliv teploty na materiálové vlastnosti oleje lze sledovat na změně dynamické viskozity. Předpokládáme-li rozmezí teplot od počáteční teploty 20 °C až po maximální provozní teplotu 80 °C, pak bude docházet ke změně dynamické viskozity z hodnoty $\eta = 1,06 \text{ Pa.s}$ na hodnotu $\eta = 0,1 \text{ Pa.s}$. Na obr. 4.25a až obr. 4.25e jsou tyto varianty zobrazeny. Simulace probíhala na modelu osamoceného ozubeného kola se šikmými zuby.



Obr.4.25a až e – vliv změny viskozity na charakter proudění v případě osamoceného kola

Jak je patrné, se zvyšující se teplotou dochází ke znatelnému snížení mazacích schopností oleje. Během zahřátí olejové lázně až na provozní teplotu dochází k výrazným změnám v množství odstříknutého oleje za ozubeným kolem. I když je studie uskutečněna pouze na jednoduchém případě osamoceného kola, je vliv změny dynamické viskozity oleje patrný. Předpokládáme-li stav provozu převodového soukolí za ustálené teploty např. 50 °C, která odpovídá hodnotě kinematické viskozity $\eta = 0,604 \text{ Pa.s}$, jsou podmínky pro rozstřík oleje ještě stále příznivé. V případě teploty 65 °C se olej dostává do místa záběru, ovšem při vyšší hodnotě teploty nastávají pro mazání velice nepříznivé podmínky.

5. Závěr

Prací byla dokázána možnost využití numerické simulace pro řešení problematiky chování olejové lázně s ohledem na toky oleje v převodové skříně. Jedná se o nové postupy řešení velice složité nestacionární úlohy v kombinaci s vícefázovým prouděním ve tvarově náročném konstrukčním celku. Je též možno sledovat různé vlivy, které ovlivňují chování oleje. Jedná se např. o rychlost otáčení kol, velikost a tvar převodové skříně, teplota oleje, náklony hladiny olejové lázně, apod.

Problém byl nejprve zjednodušen na úlohy osamocené kola a soukolí, které se vyznačují nízkou hustotou sítě a kratší dobou výpočtu. Po těchto základních testech, kde bylo sledováno větší množství parametrů (např. provozní náklony, změna viskozity), úloha pokračovala modelem kompletní převodové skříně. Kompletní model se vyznačuje náročnou výpočetní sítí a dlouhou dobou výpočtu, přináší však důležité informace o chování nestacionárních toků oleje v reálných podmínkách provozu.

Výsledky získané v této studii a jejich interpretace, jsou použity pro získání lepšího povědomí o jevech, které během provozu nastávají v převodových skříních. Na jejich základě lze navrhnout optimalizaci konstrukce převodových soustrojí.

Práce přináší ucelený pohled na toky oleje v převodové skříně. V uvedených simulacích můžeme identifikovat místa, která nejsou dostatečně zásobena olejem, což má vliv na tepelnou bilanci uvnitř převodové skříně. Nedostatečné mazání má také za následek velký rozdíl teplot v převodové skříně, a s tím spojené zvýšení celkové teploty oleje. V důsledku špatného odvodu tepla z místa záběru může lokálně teplota přesáhnout maximální povolenou hodnotu, a tak způsobit zhoršení mechanických vlastností oleje. Nedokonalé mazání též snižuje životnost převodového soustrojí a valivých ložisek.

Na modelu osamocené ozubené kola byl ukázán rozstřík oleje ve zjednodušené skříně. S různými náklony olejové lázně lze sledovat změnu směru odstříkovaného proudu. Model soukolí přinesl do simulace vliv vytlačení části oleje odvalováním zubů v místě záběru. Velké množství oleje je díky tomuto efektu směřováno na stěny převodové skříně, odkud stéká zpět do lázně.

Kompletní model převodové skříně pak ukázal, že omezený prostor, který má olej k dispozici, ovlivňuje výšku hladiny olejové lázně, protože větší množství oleje zůstává nad místem záběru.

Provozní stavy, simulované v převodové skříně, ukázaly, že náklon hladiny olejové lázně má podstatný vliv na způsob proudění oleje uvnitř skříně. V určitých případech může mít přílišný náklon negativní vliv na mazání místa záběru, případně mazání jiných komponent (např. valivá ložiska), která jsou na předpokládaném směru odstřiku oleje závislá.

Výsledky numerické simulace jsou prvotní fází ucelenější studie vlivu provozních podmínek na toky oleje v převodové skříně. V budoucnu se mohou plánovat experimenty, které by umožnily dále potvrdit výsledky získané numerickou simulací, a dále rozšířit možnosti simulace toků oleje v kompletní převodové skříně.

Z důvodu vzniku dříve zmíněných nepříznivých stavů je nutno brát zřetel na pracovní podmínky, ve kterých je převodová skříně provozována. Negativní vliv náklonu lze například snížit navýšením množství oleje ve skříně, vyšší opotřebení oleje zase jeho častější kontrolou, případně výměnou.

V budoucnu může být studie dále rozšířena o simulaci provozních stavů a změny viskozity na modelu celé převodové skříně. Je možno také vytvořit detailnější model skříně a sledovat vliv různých konstrukčních změn (rozměry skříně, tvar kola apod.) na charakter proudění oleje. Další zkoumanou variantu může představovat neizotermní olejová lázeň, kde se viskozita mění s teplotou podle definované závislosti.

6. Seznam obrázků

Obr. 2.1 - čelní převodová skříně	- 13 -
Obr. 2.2 - náčrtek záběru dvou kol se základními parametry ozubení	- 14 -
Obr. 3.1a – model převodové skříně pro osamocené kolo	- 15 -
Obr. 3.1b – model převodové skříně pro soukolí	- 15 -
Obr.3.1c – model kompletní převodové skříně	- 16 -
Obr. 3.2a – struktura sítě při pohledu zepředu	- 17 -
Obr. 3.2b – struktura sítě při pohledu z boku	- 17 -
Obr. 3.3a – struktura sítě při pohledu zepředu	- 17 -
Obr. 3.3b – struktura sítě při pohledu z boku	- 17 -
Obr.3.4a – řez sítí modelu kompletní převodové skříně ve dvou rovinách.....	- 18 -
Obr.3.4b – boční pohled na strukturu sítě v rovině výstupního hřídele	- 19 -
Obr.3.4b – boční pohled na strukturu sítě v rovině předlohového hřídele	- 19 -
Obr. 3.4 – znázornění umístění modelované drsnosti na ozubené kolo	- 20 -
Obr. 3.5a – myšlený objem oleje v jedné zubové mezeře	- 21 -
Obr. 3.5b – stav oleje po vytlačení spoluzabírajícím kolem	- 21 -
Obr. 3.6 – překážka se štěrbinou	- 22 -
Obr. 3.7 – přiblížení kol na vzdálenost a	- 22 -
Obr. 3.8a – pozice os při uvažování přímého ozubení	- 23 -
Obr. 3.8b – pozice os při uvažování šikmého ozubení	- 23 -
Obr. 3.9 – osová vzdálenost přiblížených kol	- 23 -
Obr. 3.10 – bezrozměrné hodnoty souřadnic bodů v rovině náklonu.....	- 24 -
Obr. 3.11 – klidový stav hladiny	- 25 -
Obr. 3.12 – rozložení zrychlení do složek při náklonu.....	- 25 -
Obr. 3.12a – podélný náklon kola / soukolí.....	- 25 -
Obr. 3.12b – příčný náklon kola / soukolí	- 25 -
Obr. 3.13a – transportní rovnice pro turbulentní kinetickou energii	- 27 -
Obr. 3.13b – transportní rovnice pro specifickou rychlost disipace.....	- 27 -
Obr. 3.14 – tvar rozhraní reprezentovaný geometric reconstruction schématem	- 29 -
Obr. 3.15 – kontury fáze 2.....	- 31 -
Obr. 4.1 – příklad proudění v převodové skříní	- 34 -
Obr. 4.2a – počáteční stav v případě osamocného kola.....	- 34 -

Obr. 4.2b – počáteční stav v případě soukolí	- 34 -
Obr. 4.3a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 35 -
Obr. 4.3b – stav v čase $t = 1$ s	- 35 -
Obr. 4.3c – stav v čase $t = 2$ s	- 35 -
Obr. 4.3d – stav v čase $t = 5$ s	- 35 -
Obr. 4.4a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 36 -
Obr. 4.4b – stav v čase $t = 1$ s	- 36 -
Obr. 4.4c – stav v čase $t = 2$ s	- 36 -
Obr. 4.4d – stav v čase $t = 5$ s	- 36 -
Obr. 4.5a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 37 -
Obr. 4.5b – stav v čase $t = 1$ s	- 37 -
Obr. 4.5c – stav v čase $t = 2$ s	- 37 -
Obr. 4.5d – stav v čase $t = 5$ s	- 37 -
Obr. 4.6a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 38 -
Obr. 4.6b – stav v čase $t = 1$ s	- 38 -
Obr. 4.6c – stav v čase $t = 2$ s	- 38 -
Obr. 4.6d – stav v čase $t = 5$ s	- 38 -
Obr. 4.7a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 39 -
Obr. 4.7b – stav v čase $t = 1$ s	- 39 -
Obr. 4.7c – stav v čase $t = 2$ s	- 39 -
Obr. 4.7d – stav v čase $t = 5$ s	- 39 -
Obr. 4.8a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 40 -
Obr. 4.8b – stav v čase $t = 1$ s	- 40 -
Obr. 4.8c – stav v čase $t = 2$ s	- 40 -
Obr. 4.8d – stav v čase $t = 5$ s	- 40 -
Obr. 4.9a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 41 -
Obr. 4.9b – stav v čase $t = 1$ s	- 41 -
Obr. 4.9c – stav v čase $t = 2$ s	- 41 -
Obr. 4.9d – stav v čase $t = 5$ s	- 41 -
Obr. 4.10a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 42 -
Obr. 4.10b – stav v čase $t = 1$ s	- 42 -
Obr. 4.10c – stav v čase $t = 2$ s	- 42 -
Obr. 4.10d – stav v čase $t = 5$ s	- 42 -

Obr. 4.11a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 43 -
Obr. 4.11b – stav v čase $t = 1$ s	- 43 -
Obr. 4.11c – stav v čase $t = 2$ s	- 43 -
Obr. 4.11d – stav v čase $t = 5$ s	- 43 -
Obr. 4.12a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 44 -
Obr. 4.12b – stav v čase $t = 1$ s	- 44 -
Obr. 4.12c – stav v čase $t = 2$ s	- 44 -
Obr. 4.12d – stav v čase $t = 5$ s	- 44 -
Obr. 4.13a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 45 -
Obr. 4.13b – stav v čase $t = 1$ s	- 45 -
Obr. 4.13c – stav v čase $t = 2$ s	- 45 -
Obr. 4.13d – stav v čase $t = 5$ s	- 45 -
Obr. 4.14a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 46 -
Obr. 4.14b – stav v čase $t = 1$ s	- 46 -
Obr. 4.14c – stav v čase $t = 2$ s	- 46 -
Obr. 4.14d – stav v čase $t = 5$ s	- 46 -
Obr. 4.15a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 47 -
Obr. 4.15b – stav v čase $t = 1$ s	- 47 -
Obr. 4.15c – stav v čase $t = 2$ s	- 47 -
Obr. 4.15d – stav v čase $t = 5$ s	- 47 -
Obr. 4.16a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 48 -
Obr. 4.16b – stav v čase $t = 1$ s	- 48 -
Obr. 4.16c – stav v čase $t = 2$ s	- 48 -
Obr. 4.16d – stav v čase $t = 5$ s	- 48 -
Obr. 4.17a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 49 -
Obr. 4.17b – stav v čase $t = 1$ s	- 49 -
Obr. 4.17c – stav v čase $t = 2$ s	- 49 -
Obr. 4.17d – stav v čase $t = 5$ s	- 49 -
Obr. 4.18a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 50 -
Obr. 4.18b – stav v čase $t = 1$ s	- 50 -
Obr. 4.18c – stav v čase $t = 2$ s	- 50 -
Obr. 4.18d – stav v čase $t = 5$ s	- 50 -
Obr. 4.19a – stav v čase $t = 0,4$ s	- 51 -

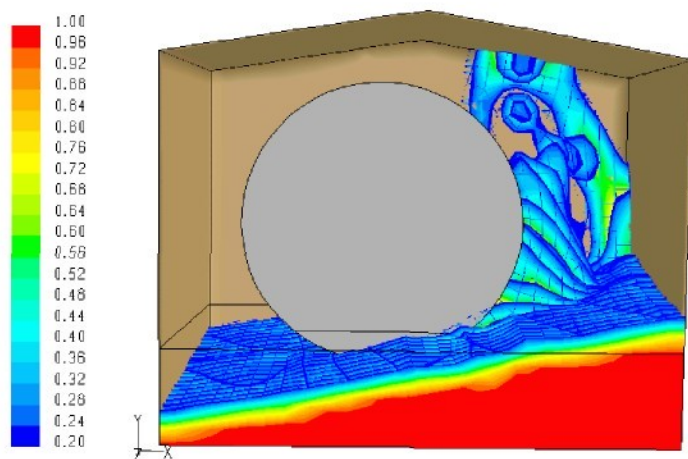
Obr. 4.19b – stav v čase $t = 1$ s.....	- 51 -
Obr. 4.19c – stav v čase $t = 2$ s.....	- 51 -
Obr. 4.19d – stav v čase $t = 5$ s.....	- 51 -
Obr. 4.20a – stav v čase $t = 0,4$ s.....	- 52 -
Obr. 4.20b – stav v čase $t = 1$ s.....	- 52 -
Obr. 4.20c – stav v čase $t = 2$ s.....	- 52 -
Obr. 4.20d – stav v čase $t = 5$ s.....	- 52 -
Obr.4.21 – model převodové skříně v programu Pro Engineer.....	- 53 -
Obr.4.22 – model převodové skříně s povrchovým zobrazením sítě	- 54 -
Obr.4.23 – počáteční stav proudění	- 54 -
Obr.4.24a – vývoj proudění v čase $t = 0,1$ s.....	- 55 -
Obr.4.24b – vývoj proudění v čase $t = 0,37$ s.....	- 55 -
Obr.4.24c – vývoj proudění v čase $t = 0,65$ s.....	- 56 -
Obr.4.24d – vývoj proudění v čase $t = 1$ s.....	- 56 -
Obr.4.25 – vliv změny viskozity na charakter proudění v případě osamoceného kola..	- 57 -

7. Literatura:

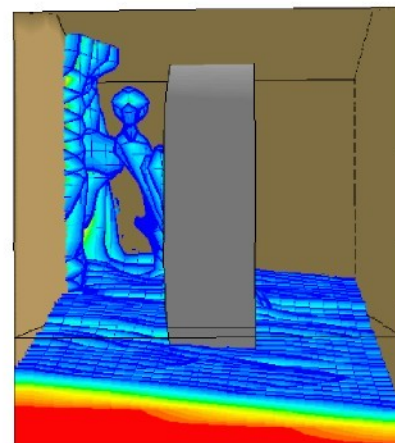
- [1] J.H.Ferziger and M. Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer Verlag, 1999, 2en Edition
- [2] Ch. E. Brennen, Fundamentals of Multiphase Flow, Cambridge University Press, New York, 2005
- [3] Fluent 6.2 Documentation
- [4] Gambit 2.2 Documentation
- [5] Fluent News, <http://www.fluent.co.uk>
- [6] R. Kříž a kolektiv, Stavba a provoz strojů II – Převody, SNTL, Praha, 1978
- [7] D. L. Youngs, Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion. In K. W. Morton and M. J. Baines, editors, *Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Academic Press, 1982.
- [8] David C. Wilcox: Basic Fluid Mechanics, DCW Industries, 2003
- [9] Převodové skříně: http://www.setra-gear.cz/cmd_france_er_master.html

Přílohy:

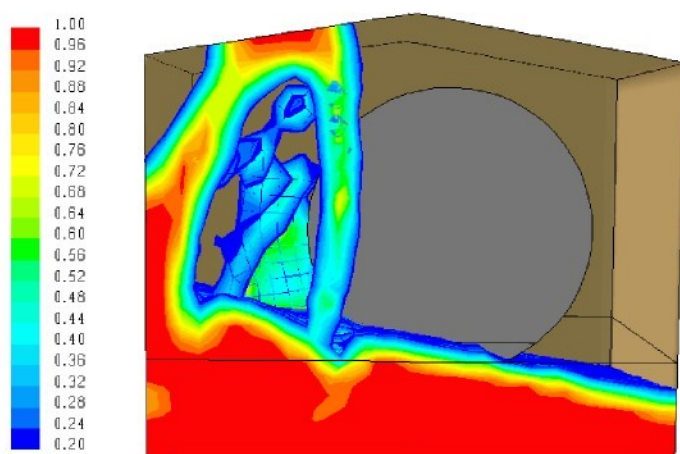
Ustálené stavy proudění v různých pohledech



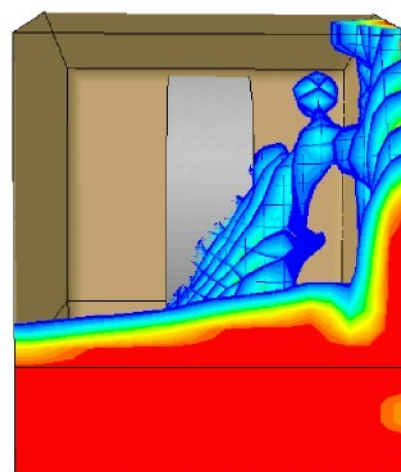
pohled zepředu



pohled z boku

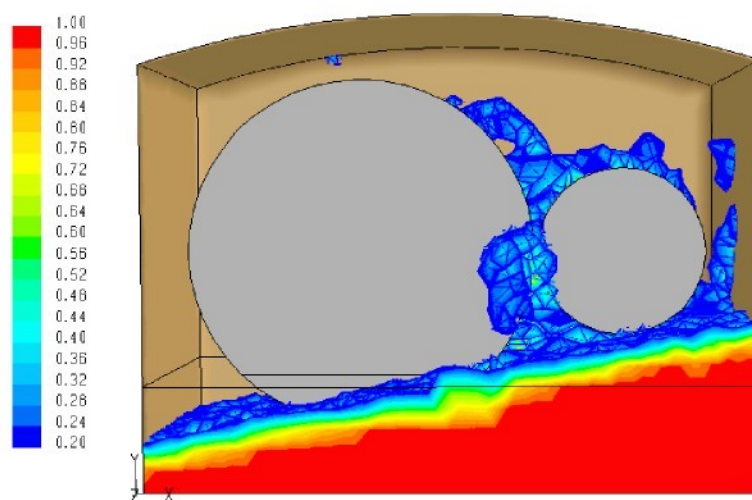


pohled zezadu

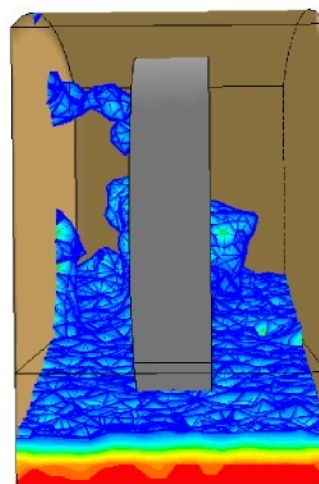


náběžná hrana

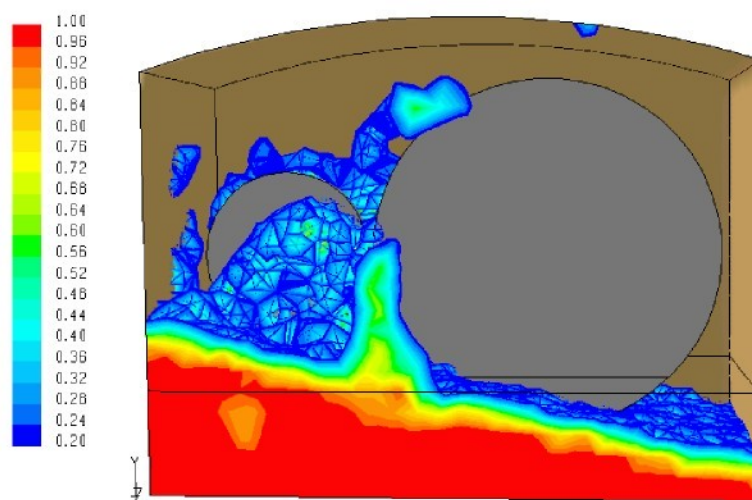
Příloha 1 – osamocené kolo při náklonu -11° - 6°



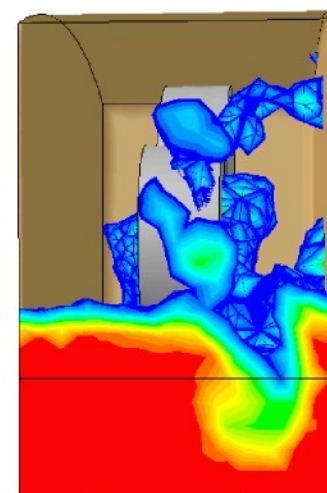
pohled zepředu



pohled z boku

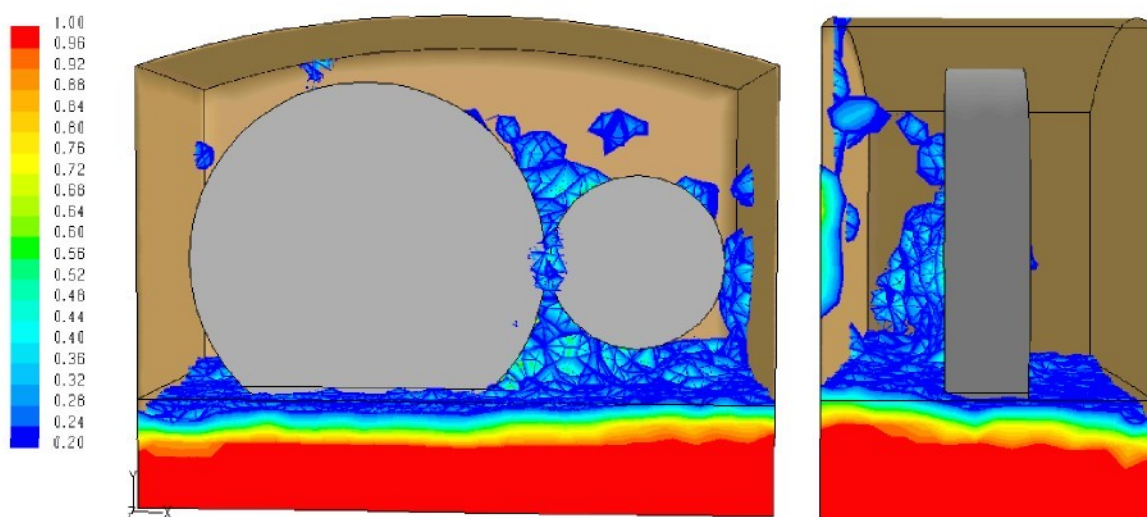


pohled zezadu



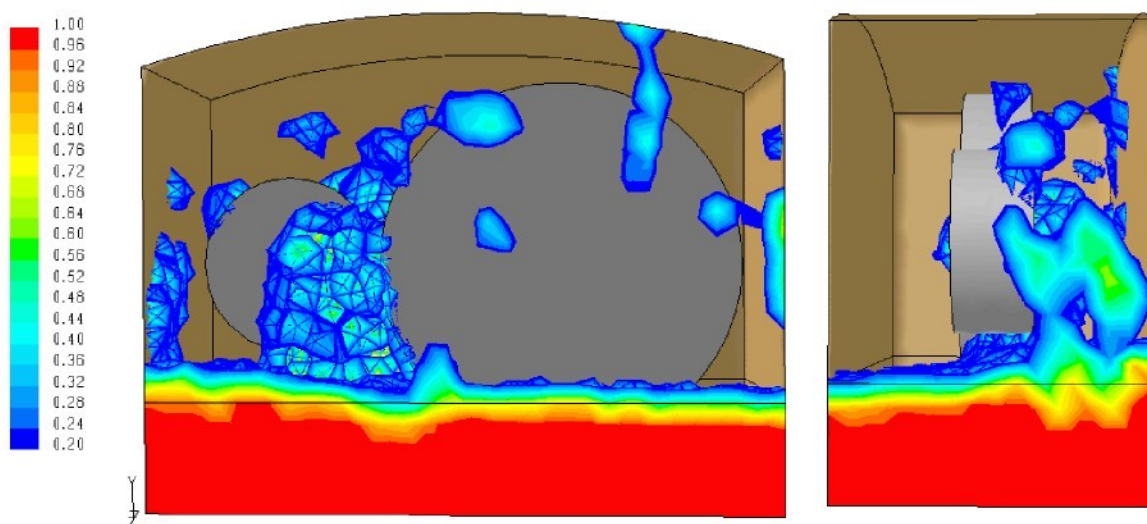
náběžná hrana

Příloha 2 – soukolí při náklonu -11°



pohled zepředu

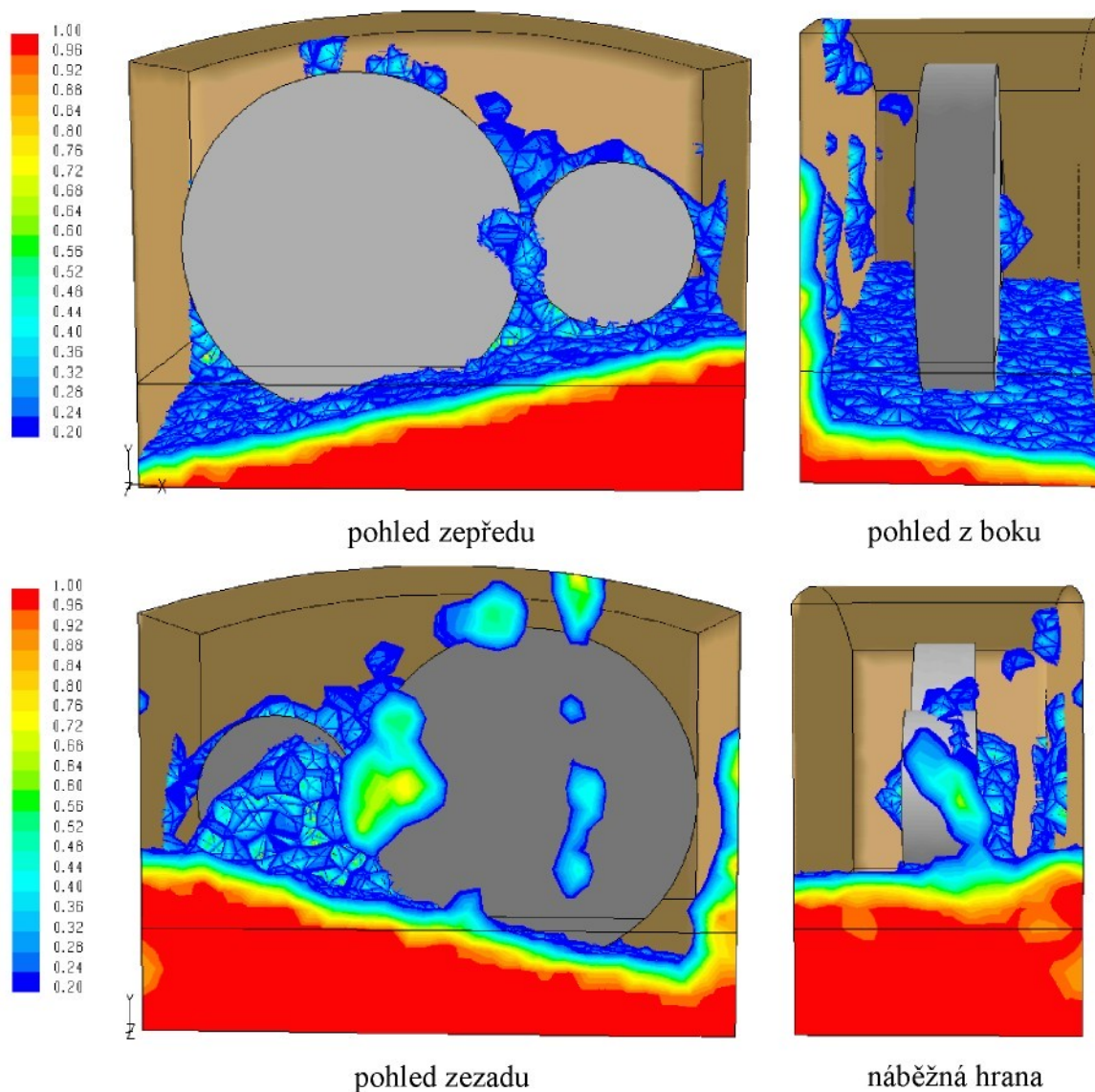
pohled z boku



pohled zezadu

náběžná hrana

Příloha 3 – soukolí při náklonu $+6^\circ$



Příloha 4 –soukolí při náklonu -11° - 6°